

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektrotechniky**

**Moderní způsoby řešení budicích obvodů MOSFET  
a IGBT tranzistorů**  
**Modern Arrangements of MOSFET and IGBT  
Drivers**

**2013**

**Pavel Dlugi**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Dlugi**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika  
Téma: **Moderní způsoby řešení budicích obvodů MOSFET a IGBT tranzistorů**  
**Modern Arrangements of MOSFET and IGBT Drivers**

Zásady pro vypracování:

1. Rozdělte a popište výkonové polovodičové součástky a jejich budicí obvody.
2. Detailněji se zaměřte na moderní budicí obvody MOSFET a IGBT, speciálně na budicí obvody s optickým vstupem.
3. Proveďte průzkum trhu a vyhledejte výrobce a dodavatele budicích obvodů výkonových spínacích prvků.

Seznam doporučené odborné literatury:

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 1. Plzeň: ZČU 2003.  
Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 6. Plzeň: ZČU 2008.  
Wintrich, A.: Application Manual Power Semiconductors. Nuremberg : SEMIKRON International GmbH, 2011.  
Pavelka, J., Čeřovský, Z., Lettl, J.: Výkonová elektronika, Praha: skriptum ČVUT 2007.  
Černík, M.: Výkonové polovodičové spínače a výkonová elektronika. Liberec: TUL 2008.  
Rashid, M. H.: Power Electronics Handbook. Pensacola, Florida 2001.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 2. 5. 2013

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především panu Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace při přípravě mé bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá moderním způsobem řešení budicích obvodů s IGBT a MOSFET tranzistory. Budiče jsou řídicí obvody, které slouží ke spínacím účelům polovodičových součástek. Moderním způsobem řešení budiče rozumíme jeho modifikaci. V tom to konkrétním případě, jde o modifikaci na vstupu budiče. Kdy je nahrazen klasický kabelový vstup, optickým vstupem. V teoretické části jsou popsány polovodičové spínací prvky a jejich dynamické vlastnosti. Dále je teoreticky vysvětlen řídicí obvod, jeho vlastnosti a na něho kladené požadavky. V praktické části je popsán budič s optickým vstupem. Jeho princip funkčnosti a jeho vlastnosti. Následuje v praktické části průzkum trhu, kde výrobce budičů s optickým vstupem je pouze firma CT Concept. Budiče jsou rozděleny podle výrobců IGBT a MOSFET tranzistorů pro jednotlivé budicí obvody, které firma CT Concept nabízí.

## **Klíčová slova**

MOSFET tranzistor, IGBT tranzistor, budič, optické vlákno

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with modern way of solution of driving circuits with IGBT and MOSFET transistors. Drivers are control circuits that are determined for switching purposes of semiconductor components. Modern way of solution of driver is its modification. In this case it is a modification of input of a driver. Cable input is replaced with optical input. In theoretical part, semiconductor switching components and their dynamic features are described. Subsequently, control circuit, its features and requirements are explained. In practical part, a driver with optical input, its principle of function and its features are described. Subsequently there is a market research, the only manufacturer of drivers with optical input is company CT Concept. Drivers are divided according to manufacturers of IGBT and MOSFET transistors for individual driving circuits that CT Concept offers.

## **Keywords**

MOSFET transistor, IGBT, driver, optical fiber

## Seznam zkratk a použitých symbolů

$+U_{CC}$	Kladné napájecí napětí	[V]
$-U_{CC}$	Záporné napájecí napětí	[V]
$A$	Anoda	
$B$	Báze	
$C$	Kolektor	
$C_{DS}$	Parazitní kapacita mezi drain a source	[F]
$C_{GD}$	Parazitní kapacita mezi gate a source	[F]
$C_{GS}$	Parazitní kapacita mezi gate a drain	[F]
$C_{iss}$	Kondenzátor výkonového tranzistoru	[F]
$D$	Drain	
$D_0$	Nulová dioda	
desat.	desaturace	
$D_H$	Horní Dioda	
$E$	Emitter	
$G$	Gate	
GTO	Gate turn-off thyristor	Gate vypínatelný tyristor
$I$	Proud	[A]
$i_A$	Proud anody	[A]
$I_B$	Proud báze	[A]
$I_C$	Proud kolektoru	[A]
$i_D$	Proud drainu	[A]
$I_{DM}$	Maximální impulsní proud kolektoru	[A]
$i_f$	propustný proud	[A]
$i_G$	Proud hradla	[A]
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor	Tyristor s integrovaným hradlem
$I_{GM}$	Proud	[A]
$I_{GR}$	Proud	[A]
$I_{GT}$	Proud	[A]
$i_H$	Vratná proud	[A]
$i_L$	Proud	[A]
$i_R$	Závěrný proud	[A]
$i_{RG}$	Vypínací proud řídicí elektrody	[A]
$i_{rr}$	Zotavovací proud	[A]
$i_{rrM}$	Maximální zotavovací proud	[A]
$i_T$	Propustný proud	[A]

JFET	Junction feild effect transistor	Unipolární tranzistor izolován záporně polovaným PN přechodem
K	Katoda	
$K_{+U}$	Komparátor napájecího napětí	
$K_P$	Komparátor přepětí	
$K_S$	Komparátor saturace	
$K_{-U}$	Komparátor napájecího napětí	
$K_\Theta$	Komparátor teploty	
$L$	Indukčnost	
$L_G$	Indukčnost gate	
LOW	Nízký	
$L_P$	Parazitní indukčnost	
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transist	hradlo izolované kysličníkem kovu
$mp$	Mezní přímka	
$ms$	Mez saturace	
off	Vypnutí	
on	Zapnutí	
$P_{TOT}$	Ztrátový výkon	[W]
PWM	Pulse width modulation	Pulzní šířková modulace
$Q_r$	Komutační náboj	[C]
refer.	referenční	
$r_f$	Propustný odpor	[ $\Omega$ ]
$R_G$	Odpor gatu	[ $\Omega$ ]
Rg.off	Odpor vypnutí	[ $\Omega$ ]
Rg.om	Odpor zapnutí	[ $\Omega$ ]
$r_R$	Závěrný odpor	[ $\Omega$ ]
S	Source	
sig.	Signál	
$S_{lkrit}$	Strmost nárůstu proudu	
$SiO_2$	Oxid křemičitý	
SO	Stavový výstup napájení	
$Sp$	Spínač	
$T$	Perioda	
$t_d$	Doba zpoždění	[s]
$T_D$	Dolní tranzistor	
$t_f$	Doba poklesu	[s]
$t_{gt}$	Zapínací doba tyristoru	[s]
$T_H$	Horní tranzistor	
$T_{jmax}$	Teplota polovodičové struktury	[°C]



$t_{OFF}$	Doba vypnutí	
$t_{ON}$	Doba zapnutí	
$t_p$	Doba poklesu	[s]
$t_q$	Vypínací doba tyristoru	[s]
$t_r$	Doba nárůstu	[s]
$T_R$	Transformátor	
trojúhe.	Trojúhelníkového	
$t_{rr}$	Závěrná zotavovací doba	[s]
$t_s$	Doba přesahu	[s]
$t_{tail}$	Doba doznívání	[s]
T <sub>vn</sub>	Signálový tranzistor	
$U$	Napětí	[V]
$U_{(BO)}$	Blokovací napětí	[V]
$U_{(BR)DSS}$	Průrazné napětí	[V]
$U_{(To)}$	Prahové napětí	[V]
$U_{BE}$	Napětí emitor báze	[V]
$U_{CB}$	Napětí kolektor báze	[V]
$U_{CE}$	Napětí kolektor emitor	[V]
$U_{CEsat}$	Napěťový úbytek	[V]
$u_D$	Výkonový zdroj napětí	[V]
$U_{DC}$	Stejnoseměrné napětí	[V]
$u_{DS(on)}$	Napětí ve vodivém stavu	[V]
$U_f$	Propustný napětí	[V]
$u_G$	Napětí hradla	[V]
$U_{GE}$	Napětí gate emitor	[V]
$u_{GS}$	Napětí gate source	[V]
$U_{GS(th)}$	Prahové napětí	[V]
$u_{GSmax}$	Maximální napětí gate source	[V]
$U_{in}$	Vstupní napětí	[V]
$U_K$	Komutační napětí	[V]
$U_{LR}$	Napětí zdroje s nízkou indukčností	[V]
$U_R$	Závěrný napětí	[V]
$U_{RM}$	Komutační přepětí	[V]
$U_{RRM}$	Opakovatelné špičkové závěrné napětí	[V]
vyp.	Vypnuto	
zap.	Zapnuto	

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Rozdělení polovodičových součástek.....</b>	<b>12</b>
1.1 Dioda .....	13
1.2 Tyristor .....	15
1.3 Vypínatelný tyristory .....	17
1.4 Bipolární tranzistor.....	22
1.5 Unipolární tranzistor .....	23
1.6 IGBT tranzistor.....	27
<b>2. Budiče.....</b>	<b>29</b>
2.1 Budiče bez galvanického oddělení .....	30
2.2 Budiče s galvanickým oddělením .....	31
2.3 Budicí obvody tranzistorů MOSFET .....	32
2.4 Budicí obvody pro IGBT tranzistory.....	35
2.5 Budič s optickým vstupem.....	37
2.6 Optické vlákno .....	44
<b>3. Průzkum trhu .....</b>	<b>46</b>
3.1 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy ABB.....	46
3.2 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Dynex .....	48
3.3 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Fuji .....	49
3.4 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Hitachi.....	50
3.5 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Infineon (eupec).....	51
3.6 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Ixys .....	53
3.7 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Mitsubishi/Powerex.....	54
3.8 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Toshiba.....	55
3.9 Důležité parametry budiče pro výběr.....	56
<b>5. Závěr .....</b>	<b>58</b>
<b>Bibliografie .....</b>	<b>59</b>

## Úvod

Bakalářská práce je rozdělena do tří hlavních bodů. V prvním bodě jsou rozdělené polovodičové spínací prvky podle jejich řiditelnosti, do třech skupin. Na neřízené, řízené s neřízeným vypnutím a řízené s řízeným vypnutím. Následuje popis jednotlivých typů polovodičových součástek, kterými jsou polovodičová dioda, tyristor, vypínatelný tyristory GTO a IGCT, bipolární tranzistor, unipolární tranzistor a IGBT tranzistor. U součástek jsou popsány jejich princip struktury, základní vlastnosti a jejich dynamické parametry. U unipolárního tranzistoru a IGBT tranzistoru jsou popsány i statické vlastnosti.

V dalším oddíle jsou charakterizovány budiče, vyjmenovány jejich hlavní požadavky a jejich rozdělení podle způsobu zpracování řídicího signálu a to zdali je galvanicky oddělený, či nikoliv. Rozbor principů funkce těchto dvou budičů a možnosti způsobu galvanického oddělení řídicího signálu. Dále jsou vymezeny základní řídicí obvody MOSFET tranzistorů a IGBT tranzistorů, konkrétní zobrazení jednotlivých typů zapojení a jejich vlastnosti, případně princip činnosti. Posléze je popsán samotný budič s optickým vstupem a je vybrán konkrétní typ, na němž jsou ukázány principy činnosti, způsob pracování optického vstupu, popis konektoru x2 a druhy ochran. Poté je i zmínka o optickém vlákně, jeho rozdělení na základní typy a vysvětlení jeho vlastností, výhody a nevýhody.

V konečné části je realizován průzkum zahraničního trhu pro budiče s optickým vstupem. Řídicí obvody jsou rozděleny podle výrobců IGBT, MOSFET tranzistorů, napětí  $U_{ce}$  a proudu  $I_c$ . Na závěr jsou uvedeny základní parametry, na které se má uživatel zaměřit pro výběr budiče pro konkrétní tranzistor.

Cílem bakalářské práce je popsat budič s optickým vstupem, jeho princip funkčnosti, výhody a nevýhody oproti budičům s klasickým kabelovým vstupem.

# 1. Rozdělení polovodičových součástek

Součástky rozdělíme z hlediska řiditelnosti na neřízené polovodičové součástky, řízené polovodičové součástky s neřízeným vypnutím a řízené polovodičové součástky s řízeným vypnutím. Dále popíší jednotlivé polovodičové součástky (dioda, tyristor, GTO, IGCT, bipolární tranzistor, unipolární tranzistor a IGBT tranzistor) jejich dynamické vlastnosti a u tranzistorů unipolárního a IGBT i statické vlastnosti.

## Neřízené polovodičové součástky

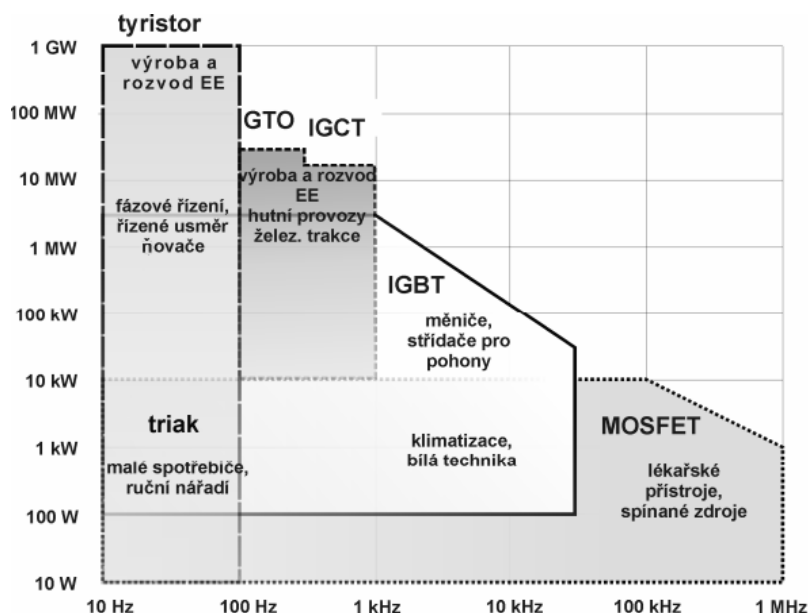
Neřízené polovodičové součástky neobsahují žádné řídicí struktury. Funkce odpovídá polaritě nebo velikosti napětí, které je na ni přiloženo. Struktura obsahuje dvě elektrody. Požívají se pro usměrňovače a ochranné funkce. Jedná se o polovodičové součástky- diody a diak. [1]

## Řízené polovodičové součástky – s neřízeným vypnutím

Prvky mají jednu řídicí elektrodu a dvě proudové elektrody. Řídicí elektroda pracuje jen na počátku sepnutí. Hlavní proud musí být přerušen zvnějšku. Používají se ve střídačových obvodech jako fázový spínač. Jedná se o polovodičové součástky – Tyristor a Triak. [1]

## Řízené polovodičové součástky – s řízeným vypnutím

Prvky obsahují minimálně jednu řídicí a dvě proudové elektrody. Hlavní proud je v pracovní oblasti charakteristiky, která musí být přímo úměrný signálu na řídicí elektrodě. Hlavní elektroda má funkci zapínání a vypínání proudu. Jedná se o polovodičové součástky – tyristor GTO a IGCT, tranzistor bipolární, tranzistor řízený polem MOSFET, IGBT bipolární řízený polem. [1]

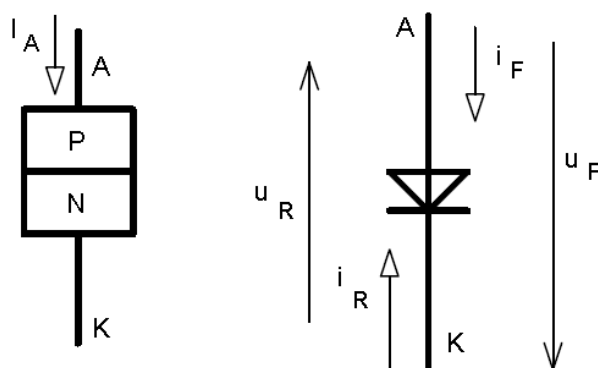


Obr. 1.0.1.:Přehled použití výkonových součástek dle řízeného výkonu a frekvence [1]

## 1.1 Dioda

Polovodičová dioda je tvořena jedním PN přechodem (obr. 1.1.1). Pokud je polovodič typu P (anoda) vzhledem k polovodiči typu N (katoda) kladného napětí, je dioda propustným stavu. Diodou prochází propustný proud  $i_F$ , který je určen zátěží, a je na něm propustné napětí  $u_F$ . [2] [3]

Pokud má polovodič typu P (anoda) vzhledem k polovodiči typu N (katoda) záporné napětí, je dioda v závěrném směru. Na diodě je závěrné napětí  $U_R$  určené velikostí napětí vnějšího zdroje a prochází jí závěrný proud  $i_R$ . [2] [3]



Obr. 1.1.1.: Diodová schematická značka s terminologií proudů a napětí a struktura diody [5]

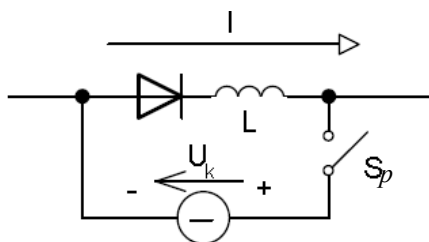
### Zatížitelnost

**Napětíová zatížitelnost** je určena především opakovatelným špičkovým závěrným napětím  $U_{RRM}$ . Je to nejvyšší přípustná hodnota závěrného napětí, která se na diodě může periodicky opakovat. [2]

**Proudová zatížitelnost.** Při provozu diody vzniká ztrátový výkon, který je vytvářen propustným proudem  $i_F$ . Vypínací ztrátový výkon se zpravidla uplatňuje až při spínacích kmitočtech vyšších než 400Hz. Celkový ztrátový výkon nesmí zahřívat polovodičovou strukturu diody nad její maximální dovolenou hodnotu. [2]

### Dynamické parametry diody

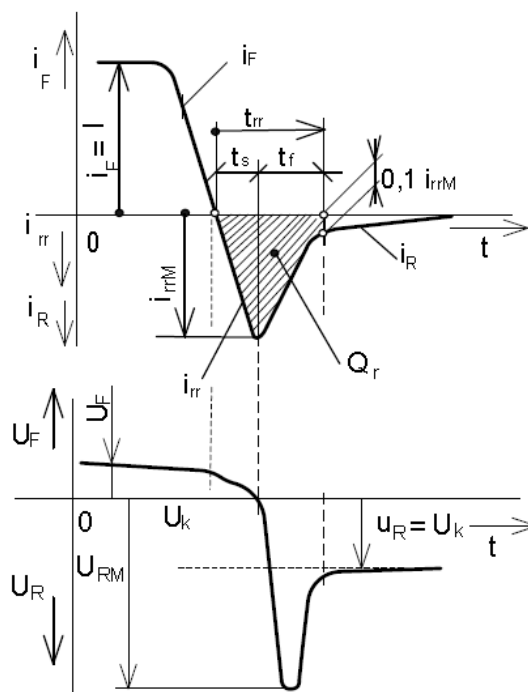
Z dynamických jevů diody má nejvyšší význam přechod ze sepnutého do zavřeného stavu. Tento jev se nazývá vypínání diody nebo také komutace. [2]



Obr. 1.1.2.: Schéma komutace (vypnutí) diody [5]

Obr. 1.1.2.: Schéma pro rychlé vypínání. Po sepnutí spínače  $Sp$ , jde do větve s diodou komutační napětí  $U_k$ , které zapříčiní zánik propustného proudu, kde rychlost zániku je dána vztahem. [2] [3]

$$\frac{di_F}{dt} = \frac{U_k}{L} \quad [A, s, V, H] \quad (1.1)$$



Obr. 1.1.3.: Charakteristika proudu a napětí při komutaci (vypnutí) diody[5]

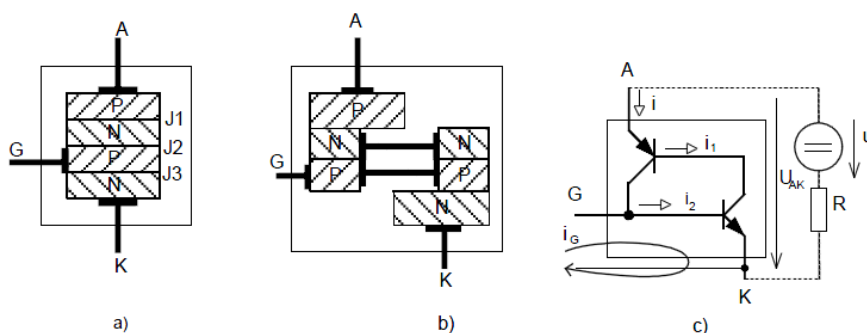
Průběhy proudů a napětí jsou naznačeny na obr. 1.1.3.: Když poklesne proud  $i_F$  k nule, tak přechází a zachovává původní strmost poklesu do závěrného směru. Po přechodu proudu z propustného do závěrného směru, tak proud prudce klesá na hodnotu závěrného proudu, kdy je dioda schopna udržet závěrné napětí. Zotaví se její závěrný odpor  $r_R$ , pro čas  $t_{rr}$ , který označuje závěrný zotavovací dobu. Po dobu závěrné zotavovací doby  $t_{rr}$  protéká komutační proud nebo proudem zotavovacím, a značíme jej  $i_{rr}$ . Doba  $t_{rr}$  bude větší, čím větší bude komutační náboj diody  $Q_r$ . [2] [3] [4]

$$Q_r = \int_0^{t_{rr}} i_{rr} dt \quad [C, s, A, s] \quad (1.2)$$

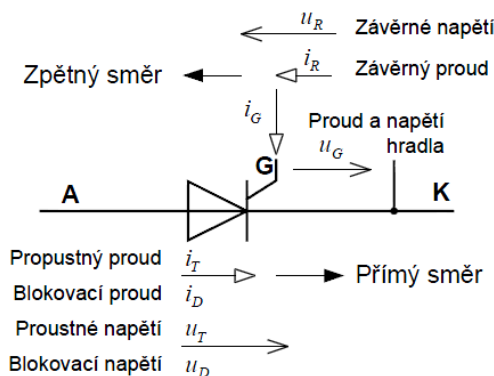
Velikost komutačního náboje diody je závislý na křemíkové destičce a na použité technologii výroby. Komutační náboj ovlivňuje velikost původního propustného proudu vypínací diody, strmost poklesu tohoto proudu a teplotu přechodu. Strmý pokles komutačního proudu ze své maximální hodnoty  $i_{rrM}$  zapříčiňuje vznik napětí na indukčnosti  $L$ . Napětí na indukčnosti nepříznivě ovlivňuje komutační napětí, což v důsledku přinese vznik komutačního přepětí.  $U_{RM}$ . Komutace diody má další nepříznivé vlastnosti, - vznikají vypínací ztrátové výkony, to však při práci na kmitočtech větších jak 400Hz. [2] [3]

## 1.2 Tyristor

Tyristor je čtyřvrstvá polovodičová řízená součástka se třemi PN přechody. Tato struktura je zobrazena na obr. 1.2.1. a.: Anoda A je spojena s krajní vrstvou s vodivostí P a katoda K s krajní vrstvou vodivosti typu N. Vnitřní vrstvy se nazývají N – báze a P – báze. S P – bází je spojena řídicí elektroda G. [5]



Obr. 1.2.1.: Struktura tyristoru [5]



Obr. 1.2.2.: Schematická značka a orientace veličin [5]

Vypnutí tyristoru nelze u základních typů řídicí elektrodou ovlivnit. Vypnutí nastane tehdy, když zanikne propustný proud a dojde k obnovení blokovacích schopností tyristoru. [3] [5]

### Dynamické parametry

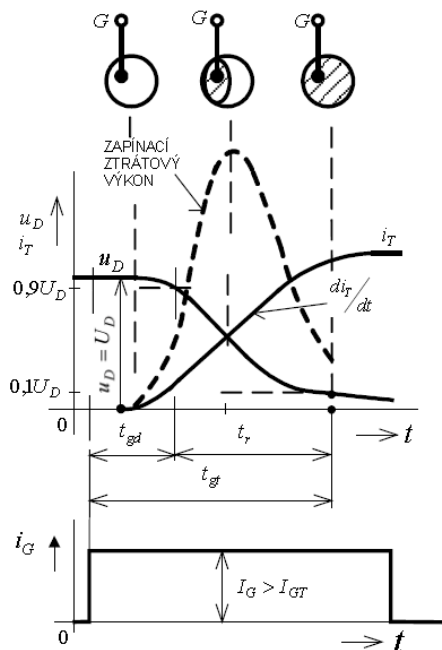
Dynamické procesy vznikají při připojování blokovacího napětí, při zapínání a vypínání tyristoru. Připojením blokovacího napětí a při jeho nárůstu může dojít k sepnutí tyristoru bez řídicího signálu, i když nedojde k překročení hodnoty napětí  $U_{(B0)}$  anodovým napětím. [2] [3]

Dovolená strmost nárůstu napětí je uvedena v katalogu a tato hodnota nesmí být překročena. Připojením odpor mezi řídicí elektrodu a katodu, zvýšíme hodnotu  $du_D/dt$ . Omezením strmosti napětí je provedena pomocí RC členu, který je zařazen paralelně k tyristoru. [2] [3]

$$S_{Ukrit} = \left( \frac{du_D}{dt} \right)_{krit} \left[ \frac{U}{s}, U, s \right] \quad (1.3)$$

## Zapínání tyristoru

Při přivedení zapínacího impulsu nedojde k okamžitému sepnutí tyristoru. Anodový proud nejdříve začne protékat tenkým kanálem, který se nachází v blízkosti řídicí elektrody. Z tohoto místa se postupně šíří do celého průřezu tyristoru. [3] [5]



Obr. 1.2.3.: Průběh zapínání tyristoru [5]

Při zapínání tyristoru jsou charakterizující následující úseky.

Doba zpoždění  $t_d$  – je čas potřebný k vytvoření proudového kanálu. Ten to časový úsek je roven mezi začátkem řídicího impulsu a okamžikem, kdy dojde k poklesu napětí na tyristoru na 90% původní hodnoty. [2] [3]

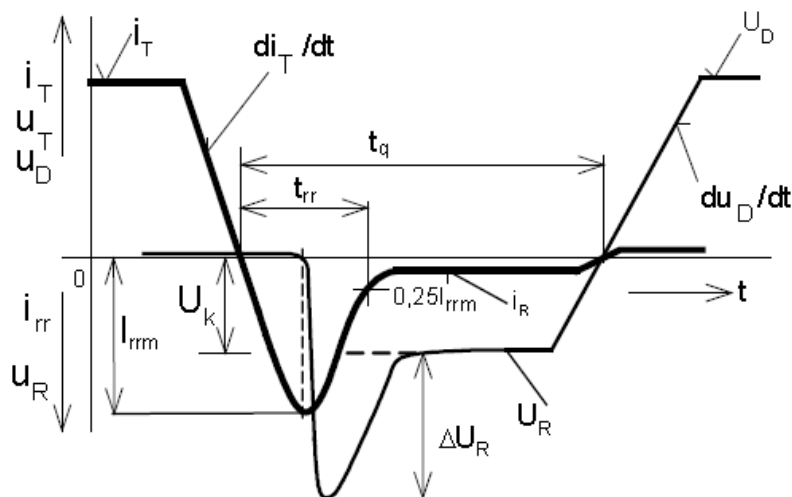
Doba poklesu  $t_p$  – čas šíření vodivosti v průřezu vodivosti v průřezu tyristoru. Je určena poklesem anodového napětí z 90% na 10% původní hodnoty. [2] [3]

Zapínací doba tyristoru  $t_{gt}$  je určena součtem obou časů. Rychlost zapínací doby závisí na velikosti zapínacího proudu  $i_G$ . Při větších nárůstech strmosti propustných proudů, kdy proud je soustředěn v okolí řídicí elektrody, může dojít k přehřátí přechodu, a tím pádem i k poškození tyristoru. Strmost nárůstu  $i_T$  je z tohoto důvodu omezován na kritickou strmost růstu propustného proudu  $S_{Ikrit}$ . [2] [3]

$$S_{Ikrit} = \left( \frac{di_T}{dt} \right)_{krit} \left[ \frac{A}{s}, A, s \right] \quad (1.4)$$



## Vypínání tyristoru



Obr. 1.3.4.: Průběh vypínání tyristoru [5]

Vypnutí tyristoru se provádí snížením napětí na hodnot vratného proud  $i_H$  na dostatečnou dobu. U vypnutí tyristoru rozeznáváme dva procesy. [2] [3]

První procesem je komutace, která je charakterizována závěrnou zotavovací dobou  $t_{rr}$  a komutačním nábojem  $Q_r$ . [2] [3]

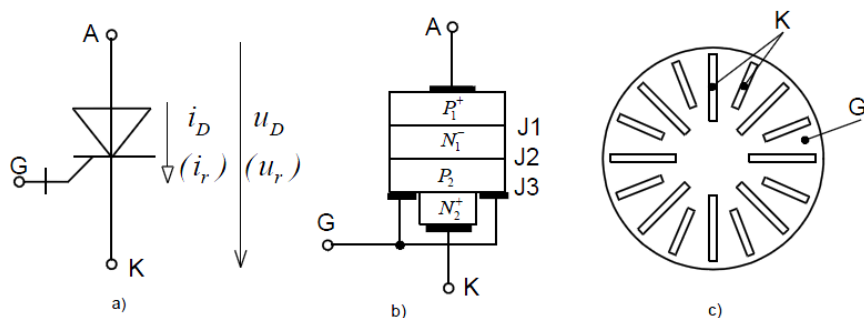
Druhým procesem je obnovení blokovací schopnosti tyristoru, která je určena vypínací dobou tyristoru  $t_q$ , jež je mnohonásobně delší než doba  $t_{rr}$ . Interval vypínací doby  $t_q$  je mezi průchodem propustného proudu nulou a časem, v němž je již možno opět přiložit na tyristor blokovací napětí, aniž by došlo k opětovnému sepnutí tyristoru. Velikost vypínací doby  $t_q$  je závislá na velikosti přiloženého závěrného napětí, na vypínaném proudu a teplotě přechodu. [2] [3]

### 1.3 Vypínatelný tyristory

U vypínatelných tyristorů je spínání stejné, jako u klasického tyristoru. Rozdílné je u vypínání, kde u těchto tyristorů je vypnutí řízené pomocí řídicího signálu. Ten to signál má opačný směr než u zapínání, a bývá mnohonásobně větší. Vypínatelné tyristory jsou GTO a IGCT. [2] [5]

Dále budou psány jen dynamické vlastnosti GTO a IGCT struktur.

## Vypínatelný GTO tyristor



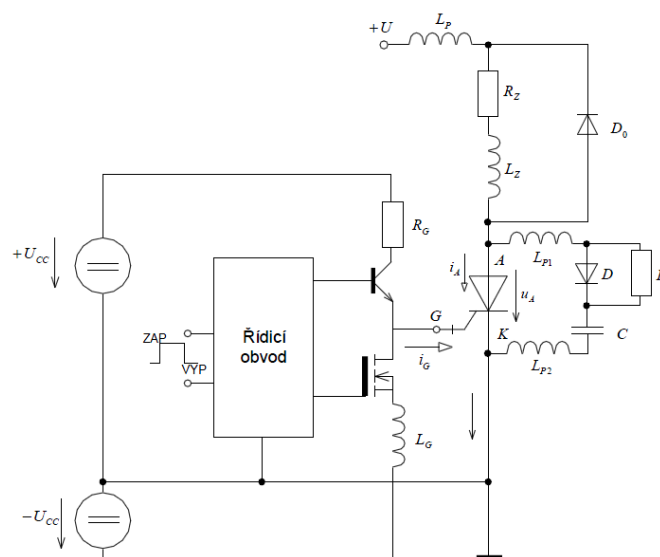
Obr. 1.3.1.: Vypínatelný GTO tyristor a) schematická značka b) uspořádání struktury c) princip rozložení řídicí elektrody (G) a katody (K) [5]

Vypínací GTO tyristor má čtyřvrstvou strukturu, která je zobrazena na obr. 1.3.1. b. Katodová vrstva  $N_2$  je silně dotovaná. Řídicí vrstva  $P_2$  je také silně obohacována, ale na rozdíl od vrstvy  $N_2$  je relativně tenká. Tyto dvě vrstvy tvoří společně katodový přechod. V blokovacím stavu pracuje vrstva  $N_1$ , je hrubší, ale slabě dotovaná elektrony. Velikost kladného napětí souvisí přímo se šířkou, kterou má GTO tyristor udržet v blokovacím stavu. Řídicí vrstva J2 je vytvářena společně s přechodem  $P_2$ . Anodový přechod J1 je vytvářen vrstvami  $P_1$  a  $N_1$ , kde  $P_1$  má podobné vlastnosti jako  $N_1$ . [3] [5]

Při vypínání je GTO struktura katody rozdělena do úzkých proužků (obr. 1.3.1. c.), počet proužků může být až několik stovek, ale v závislosti na velikosti součástky, respektive na její proudové zatížitelnosti. Tyto katody jsou obklopené paralelně propojenými hradly. [3] [5]

## Dynamické vlastnosti

GTO tyristor uvažujeme jako spínač ve spolupráci s odlehčovací sítí RCD, která je potřeba pro správnou činnost GTO tyristoru. Proto u spínacích vlastností GTO tyristoru musíme brát na zřetel i vlastnosti této sítě. Pro lepší názornost funkce celého spínače zobrazíme i řídicí obvod pro tvorbu hradlových impulsů. [3] [5]

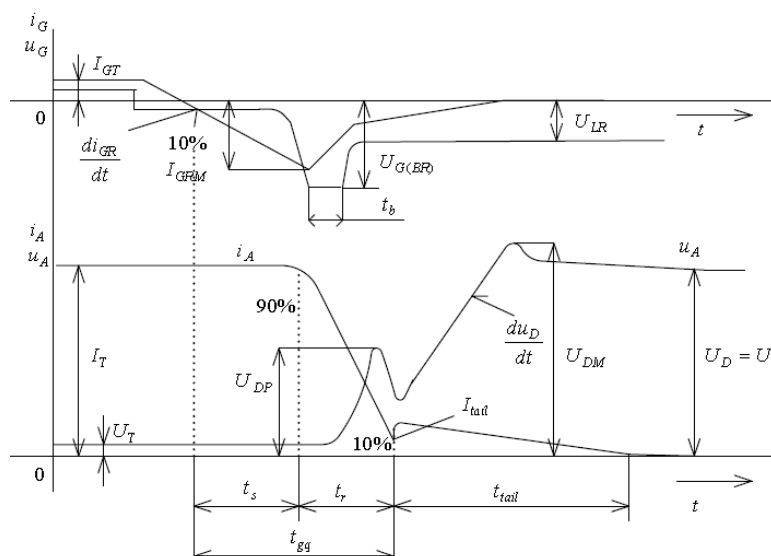


Obr. 1.3.2.: Spínač s GTO tyristorem a odlehčovací síť RCD [5]

Ve schématu jsou uvedeny parazitní indukčnosti napájecího zdroje  $L_P$  a odlehčovacího obvodu  $L_{P1}$ ,  $L_{P2}$ , tyto indukčnosti se ve skutečném obvodu vyskytují a velmi výrazně ovlivňují průběhy při zapínání a vypínání GTO tyristoru. [3] [5]

### Vypínání GTO tyristoru

Přivedeme-li mezi hradlo a katodu záporné napětí, kterým docílíme záporný hradlový proud  $i_G$ . Pokud bude dostatečně velká hodnota záporného proudu hradla, dojde ke zmenšení hodnoty proudu na řídicím přechodu J2 pod úroveň prahové hodnoty, GTO tyristor se vypne. U zapínání je potřeba malý hradlový proud, u vypínání je potřeba přes hradlo odvést část anodového proudu, který činí cca 20 až 30%. [5]



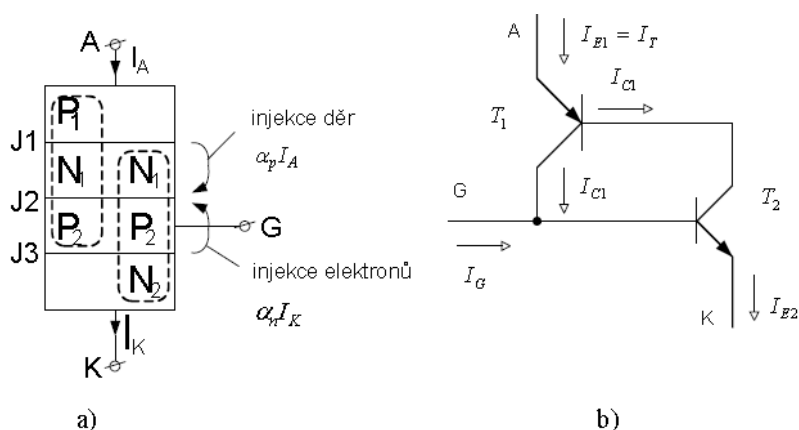
Obr. 1.3.3.: Průběh vypínání GTO tyristoru [5]

Doba přesahu  $t_S$  se určuje od 10% záporného proudu hradla  $I_{GR}$ , které poklesne až na 90% anodového proudu počáteční hodnoty. V době přesahu  $t_S$  se přechod hradlo – katoda se chová jako zkrat a záporný proud hradla narůstá o strmosti  $di_G/dt$ , která musí dosahovat vysokých hodnot, aby za krátkou dobu přesahu  $t_S$  došlo ke snížení ztrát v hradle. Tento děj má hlavně vliv na zvětšení času  $t_{tail}$  neboli proudového chvostu. Zvětšení chvostu způsobuje i velká hodnota proudové strmosti, proto musí být strmost nárůstu od 10 až 50 A/ $\mu$ s. [5]

Poté, co klesne dostatečně velké množství nosičů náboje za pomoci záporného proudu hradla v době přesahu  $t_S$ , začne s velkou strmostí klesat anodový proud. Pokud by byla strmost příliš vysoká, způsobila by přepětí v době poklesu  $t_f$ . GTO tyristor je velmi citlivý na  $dU_D/dt$  a překročení stanovené hodnoty by způsobilo falešné sepnutí tyristoru. Proto má GTO tyristor ochrannou síť. [5]

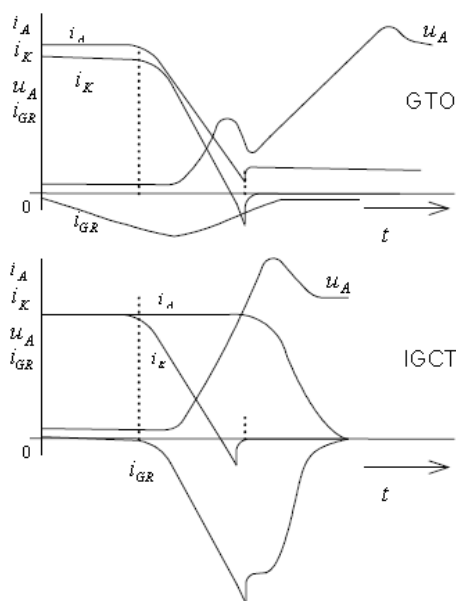
Doba doznívání  $t_{tail}$  souvisí s volnými nosiči náboje ve vrstvě  $N_1$ . V tomto čase je proud katody už skoro nulový a proud hradla  $i_G$  se rovná proudu anody  $i_A$ . V době doznívání  $t_{tail}$  vzniká největší složka spínacích ztrát, omezuje použití velkých GTO tyristorů pro frekvence okolo 1kHz. [5]

### Vypínatelný IGCT tyristor



Obr. 1.3.4.: a) Struktura IGCT tyristoru b) Tranzistorová náhrada tyristoru [5]

Zlepšením struktury GTO tyristoru vedlo k vytvoření tyristoru s integrovaným hradlem označený IGCT. Struktura polovodičová GTO a IGCT tyristoru zůstávají principu stejné. Rozdíl je v nárůstu vypínacího proudu řídicí elektrody  $i_{RG}$ . Proud anody  $I_A$  je skokově odveden na elektrodu G. Tím dojde u spodního tranzistoru  $T_2$  o polovodičové struktuře  $N_1P_2N_2$  ke skokovému vyřazení a vypínání součástky IGCT je automaticky přivedeno pouze na vypnutí horního tranzistoru o polovodičové struktuře  $N_1P_1N_2$ . Právě v tom to způsobu vypínání je rozdíl mezi GTO a IGCT struktur. [5]



Obr. 1.3.5.: Porovnání vypínání GTO a IGCT struktur [5]

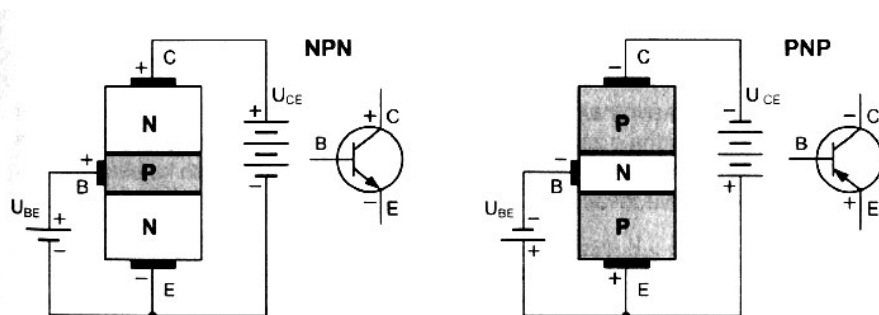
U IGCT tyristoru se dosahuje takzvané „tvrdé komutace“, obvod řídicí elektrody si vynutil minimalizaci parazitních indukčností a odporů přívodního vedení do obvodu řízení až po kontaktní plochu umístěnou přímo na desce polovodičového systému uvnitř pouzdra.

#### Důležité přednosti IGCT oproti GTO tyristorům při vypínání. [5]

- Vylučuje se proces postupného vytěšňování proudu katody a další problémy s tím spojenými
- Strmost nárůstu blokovacího napětí ( $dU_D/dt$ ) není omezen
- Odlehčovací síť RCD není potřebná
- Výrazně poklesnou vypínací ztráty
- Zkrátí se výrazně doba vypínání [5]

## 1.4 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistory mají dva PN přechody. Podle uskupení PN přechodu rozlišujeme tranzistory typu NPN a PNP. Ve výkonové elektronice se výhradně používají tranzistory NPN se zapojením se společným emitorem (obr. 1.4.1.). [3]

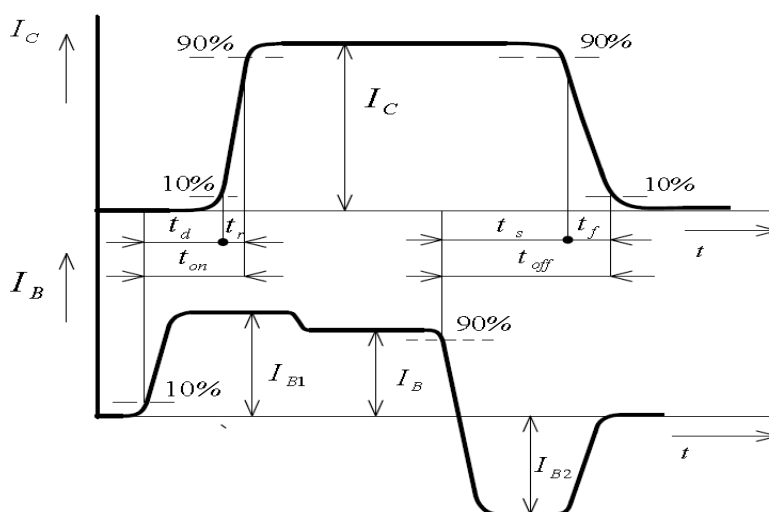


Obr. 1.4.1.: Struktura bipolárního tranzistoru se společným emitorem [4]

### Dynamické vlastnosti bipolárního tranzistoru

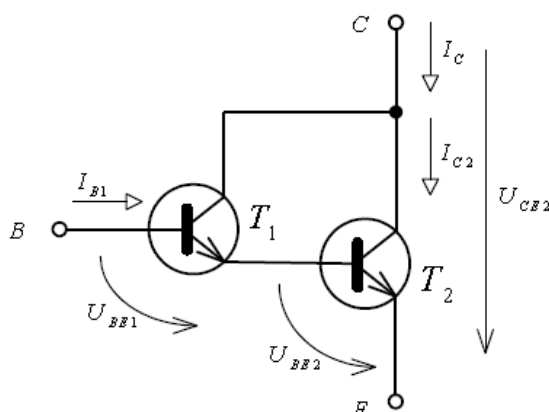
U výkonových tranzistorů se uvádí jako dynamický parametr spínací časy tranzistorového spínače. Průběh proudu kolektoru  $i_C(t)$  a proudu báze  $i_B(t)$  při zapínání a vypínání tranzistoru, který je zobrazen na obr. 1.4.2.: Tam jsou vyznačeny zapínací doby tranzistoru  $t_{ON}$ , který se skládá z doby zpoždění  $t_d$  a doby nárůstu  $t_r$ . Vypínací doba  $t_{OFF}$  se skládá z doby přesahu  $t_s$  a doby poklesu  $t_f$ . [2]

Dynamické parametry ovlivňuje spousta faktorů. Velikost zapínací doby  $t_{ON}$  se snižuje se zvyšujícím buzením tranzistoru. Proto u zapínání tranzistorového spínače se buzený tranzistor napájí zvýšeným proudem  $I_{B1}$ . Vypnutí tranzistoru se realizuje přivedením záporného proudu  $I_{B2}$ , což vede ke snížení doby přesahu  $t_s$ . Doba přesahu  $t_s$  je ovlivněna také stupněm sycení tranzistoru před jeho vypnutím. Proto je snaha u sepnutého spínače zmenšovat proud báze  $I_B$  v závislosti na proudu  $I_C$  tak, aby se tranzistor nacházel na mezi nasycení  $U_{CB} = 0$ , kdy doba přesahu  $t_s$  dosahuje nejmenší hodnoty. [3]



Obr. 1.4.2.: Průběh zapnutí a vypnutí tranzistoru [5]

Nevýhodou dynamických jevů je vznik zapínacího a vypínacího ztrátového výkonu, který nabývá vysokých hodnot a omezuje frekvenci spínání tranzistorových spínačů v rozsahu zhruba do několika kHz. Další nevýhodou bipolárních tranzistorů je, že u větších výkonů jsou poměrně malé hodnoty proudového zesilovacího činitele, což má za důsledek, že buzený tranzistor musí být buzen velkými proudy báze  $i_B$ . Proto výkonové koncové stupně musí využívat Darlingtonova zapojení (obr. 1.4.3.). Výrobci už často dodávají toto zapojení ve společném pouzdře. [2] [5]



Obr. 1.4.3.: Darlingtonové zapojení [5]

## 1.5 Unipolární tranzistor

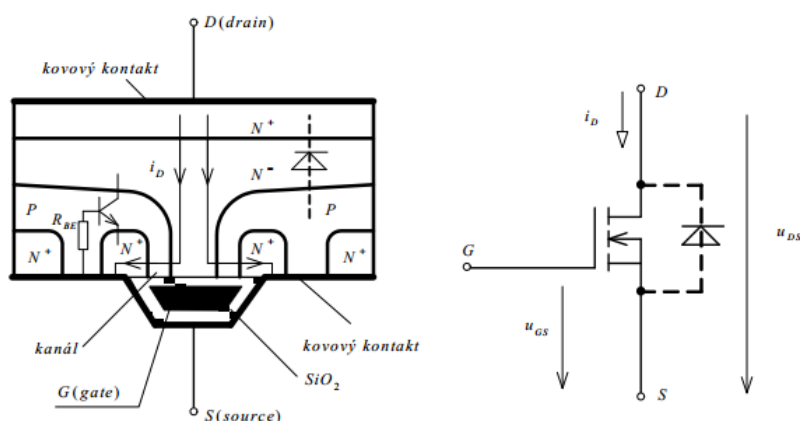
Výkonové unipolární tranzistory jsou v dnešní době důležité v konstrukci výkonových polovodičových měničů hlavně pro malé výkony. [5]

Hlavní rozdíl mezi unipolárním a bipolárním tranzistorem je způsob řízení jejich vodivosti. U bipolárních tranzistorů se používají k přechodu vodivosti oba typy nosiče náboje současně. Kdežto u unipolární struktury se využívá vždy jen jeden typ nosičů, a to buď díry, nebo elektrony. [5]

Unipolární tranzistory se rozdělují podle toho, jak je hradlo izolované od polovodičové struktury.

- JFET (z anglického Junction Field Effect Transistor) - Unipolární tranzistor izolován záporně polovaným PN přechodem.
- MOSFET (z anglického Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) – Tyto tranzistory mají hradlo izolované kyslíkem kovu, nejčastěji  $\text{SiO}_2$ . MOSFET tranzistory jsou ve spínací technice nejrozšířenější. [3] [5]

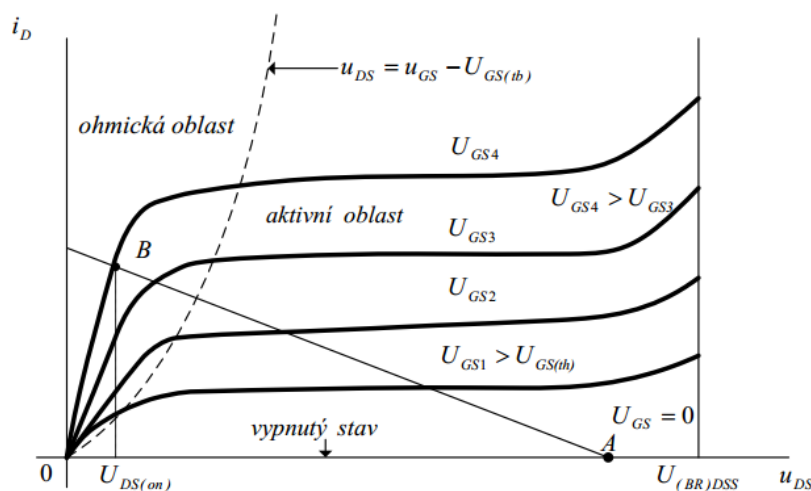
Na obr. 1.5.1 je základní seskupení MOSFET tranzistoru s kanálem typu N.



Obr. 1.5.1.: Základní struktura MOSFET tranzistoru s kanálem N a značka MOSFET tranzistoru [5]

Obbohacené vrstvy  $N^+$  tvoří kolektor D (drain) a emitor S (source). Vrstvami  $N^-$  se dají určit vlastnosti tranzistoru, a to její šířkou a dotovaným napětím. V P vrstvě vzniká kanál mezi D a S. Pokud se napětí  $u_{GS}$  na hradle G (gate) a S (source), vede to ke vzniku prostorového náboje, který vzniká pod izolační oxidovou vrstvou. Dochází k ochuzování oblasti. Pokud se napětí zvýší na velikost  $u_{GS}$  více než prahové napětí  $U_{GS(th)}$  okolo hodnoty 3 až 5V, vzniká inverzní vrstva. Jestliže bude hradlo G vůči elektrodě kladné napětí, vznikne elektrostatickou indukcí elektrické pole v izolační vrstvě, protože se záporný náboj hromadí ve vrstvě v okolí hradla, a náboj kladné polarity v blízkosti povrchu polovodiče. Kladný náboj se indukuje neustále díky hromadění záporného náboje v okolí rozhraní oxid - polovodič. Což má za důsledek to, že u rozhraní oxid polovodič vzniká vrstva polovodič typu P, čili vrstva obohacená o elektrony. Tento jev je závislý na velikosti napětí na elektrodě G a šířce izolační vrstvy. Obbohacené elektrony mohou vést v polovodiči k vytvoření vrstvy opačné polarity. (5)

## Statické vlastnosti unipolárního tranzistoru

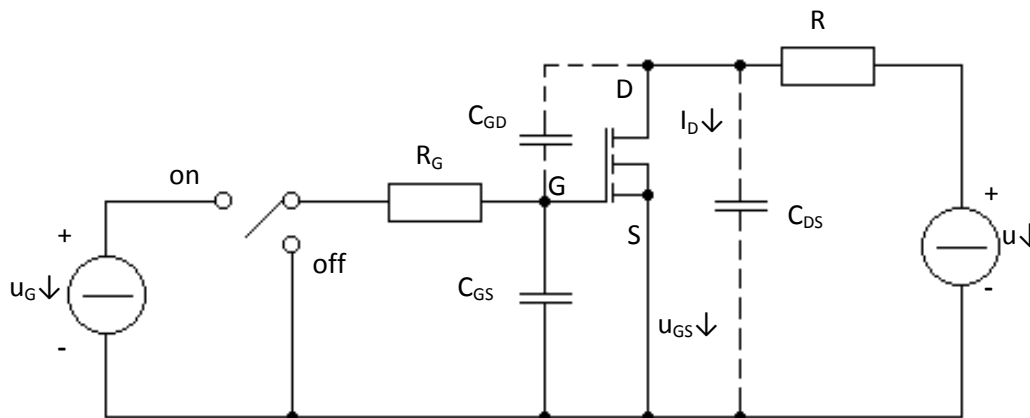


Obr. 1.5.2.: Výstupní charakteristika MOSFET tranzistoru [5]

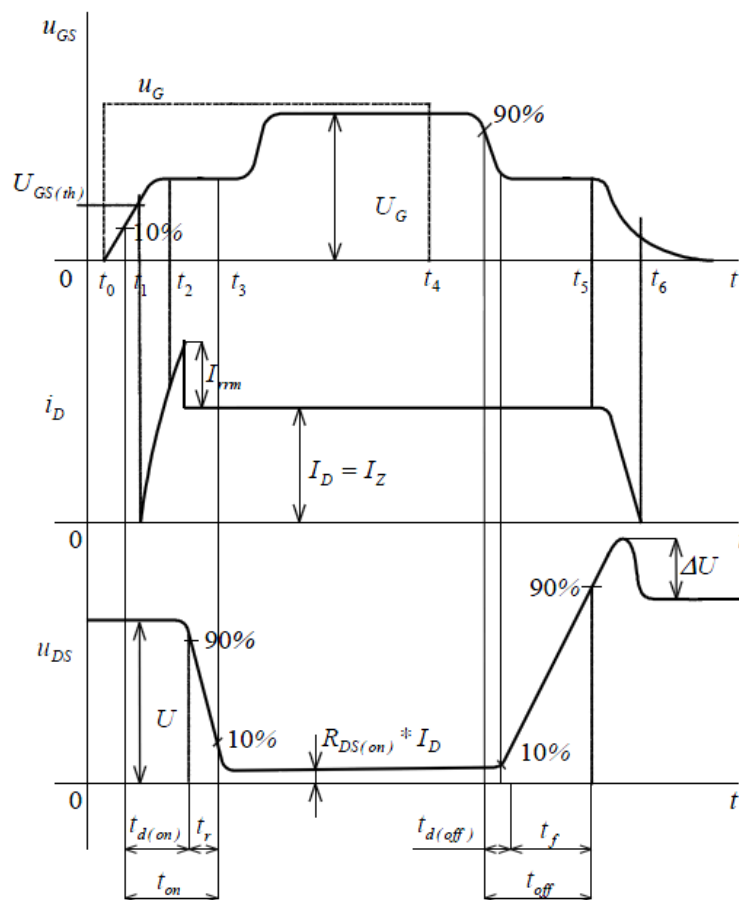


Na obr. 1.5.2 je výstupní charakteristika MOSFET tranzistoru, kde je závislost proudu kolektoru  $i_D$  na napětí kolektor emitor  $u_{DS}$  pro různé hodnoty napětí  $u_{GS}$ . Je-li napětí  $u_{GS} = 0V$ , pak je tranzistor vypnut a odpor mezi kolektorem D a emitorem S se blíží k nekonečnu (tento bod je zobrazen na obr. 1.5.2 na pracovní přímce pod označení písmene A). Tranzistor ve vypnutém stavu je odolný napětím až do hodnoty průrazného napětí  $U_{(BR)DSS}$ , které způsobí lavinový průraz NP přechodu, které je tvořen diodou. Pro vytvoření kanálu typu N musí být splněna podmínka  $u_{GS} > u_{GS(th)}$ , poté začíná téct tranzistorem proud  $i_D$ . Pokud máme dostatečně velké napětí  $u_{GS}$ , pracuje tranzistor v ohmické oblasti a napětí ve vodivém stavu  $u_{DS(on)}$  je malé. Při zvyšování napětí  $u_{GS}$  se snižuje hodnota  $u_{DS(on)}$ , ale jen do určité míry. Navíc hodnotu  $u_{GS}$  nemůžeme zvyšovat neomezeně, protože jeho hodnota má mez jako u většiny tranzistoru  $u_{GSmax} = \pm 20V$ . Ani proud nemůžeme zvyšovat neustále, protože dojde k saturaci kanálu  $u_{DS} \geq u_{GS} - u_{GS(th)}$  a tranzistor přejde do aktivní oblasti, což vede k tomu, že proud  $i_D$  je při napětí  $u_{GS}$  téměř konstantní. [2] [5]

### Dynamické vlastnosti unipolárního tranzistoru



Obr. 1.5.3.: Spínač MOSFET tranzistoru s odporovou zátěží [2]



Obr. 1.5.4.: Průběh vypínání a zapínání MOSFET tranzistoru s odporovou zátěží [5]

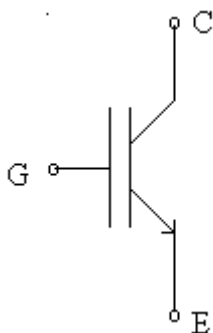
Průběh pro spínání odporové zátěže je na obr 1.5.4. V tomto průběhu jsou naznačeny a nadefinovány zapínací ( $t_{ON}$ ) a vypínací ( $t_{OFF}$ ) časy. Dále zde nalezneme dobu zpoždění pro zapnutí ( $t_{don}$ ), dobu nárůstu ( $t_r$ ), dobu přesahu ( $t_{doff}$ ) a dobu poklesu ( $t_f$ ). [2]

U dynamických vlastností se projevují poměrně velké parazitní kapacity, které jsou obsahem schématu na obr. 1.5.3, a jedná se o  $C_{GS}$ ,  $C_{GD}$  a  $C_{DS}$ . Tyto kapacity vznikají důsledkem konstrukce MOSFET tranzistoru. U zapínání tranzistoru se musí na vstup obvodu přivést vstupní napětí  $u_G$ , kde se nabíjí vstupní kapacita, důsledkem nabíjením chvíli trvá, než napětí dosáhne prahového napětí  $u_{GS(th)}$ . Teprve poté se tranzistor otevírá. Nabíjecí proud vstupní kapacity je dán velikostí  $u_G$  a  $R_G$ . Pro tuto hodnotu proudu musí být daný zdroj dimenzován, když ve statických stavech hradovým obvodem neprochází žádný proud. Odpor  $R_G$  má vliv na dobu zapínání tranzistoru. Při spínání zátěže, které obsahují indukčnost, jsou napěťové a proudové poměry na součástce obdobné jako u bipolárního tranzistoru. [2] [3]

## 1.6 IGBT tranzistor

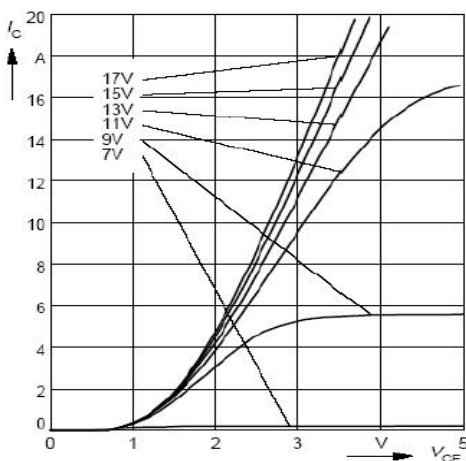
IGBT tranzistor je integrovaná kombinace bipolární a unipolární součástky. Deska tranzistoru má konstruované hradlo tenkou izolovanou oxidovou vrstvou jako u výkonových MOSFET tranzistorů. Kolektorové straně je vytvořen PN přechod, který injektuje minoritní nosiče do kanálu, když je IGBT tranzistor v sepnutém stavu. Tím dojde k výraznému snížení ztrátového výkonu v sepnutém stavu, bude malý úbytek napětí. [2]

Struktura IGBT tranzistoru je znázorněna na náhradním schématu na obr. 1.6.1. Zde můžeme určit jeho vlastnosti. Proudovou a napětovou zatížitelnost nám určuje bipolární část struktury a říditelnost je tvořena unipolární částí struktury. Pro spínání bipolárního tranzistoru se k řízení využívá nevýkonový napěťový signál. [2]



Obr. 1.6.1.: Náhradní schéma IGBT tranzistoru [2]

Výstupní voltampérová charakteristika IGBT tranzistoru je uvedena na obr. 1.6.2.: Kde parametrem napětí jsou řídicí elektrody  $U_{GE}$ . [2]

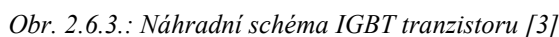


Obr. 1.6.2.: Volt-ampérová charakteristika [2]

### Zatížitelnost

Proudová a napěťová zatížitelnost se určuje obdobně jako u bipolárních tranzistorů, pokud srovnáme s MOSFET tranzistorem, jsou proudové a napěťové zatížitelnosti vyšší. Proudový výkon tranzistorů má

## Dynamické vlastnosti IGBT



Když porovnáme průběhy s MOSFET tranzistorem, doba zapínání  $t_{ON}$  a vypínání  $t_{OFF}$  je jen nepatrně větší. Na vstupu se projevuje poměrně velká vstupní kapacita tranzistoru, kterou musíme uvažovat vhodnou volbou odporu  $R_G$  a dimenzováním zdroje  $U_G$ . I pro velké proudy a napětí se udávají zapínací  $t_{ON}$  a vypínací  $t_{OFF}$  doby, které jsou cca 2  $\mu$ s. Díky tomu je umožněno spínat kmitočty až desítky kHz. U IGBT se udávají vstupní kapacity (cca tisíce pF) a totální náboj hradla (stovky nC). [2]

## 2. Budiče

Budiče neboli řídicí obvody MOSFET a IGBT tranzistorů mohou být také označovány názvem driver. Ideální budič má své hlavní požadavky.

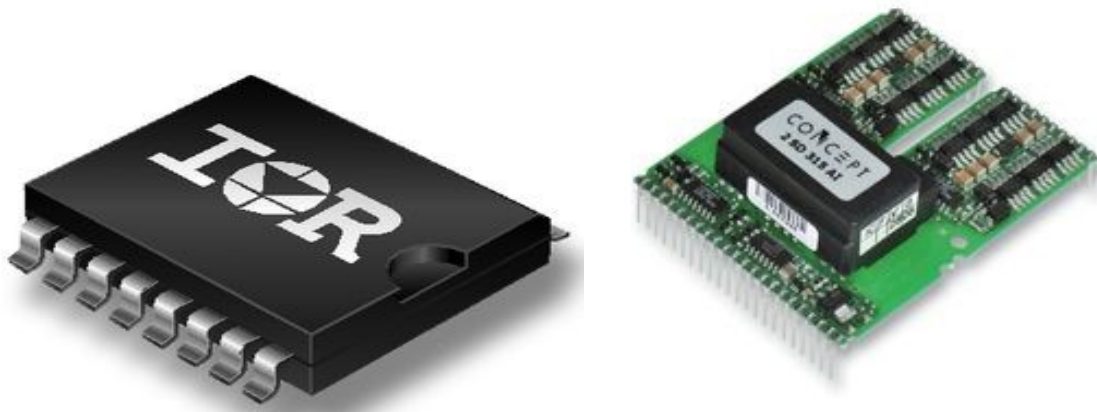
- Dynamický vnitřní odpor musí být malý.
- V oblasti hradla musí být odstraněn vysoký odpor.
- Hrana impulsu musí mít volitelnost strmosti.
- Klidový proud obvodu je zanedbatelný.
- Musí být zajištěn plovoucí provoz spínacích tranzistorů.
- Velmi malé zbytkové napětí při  $U_{GS} = „LOW“$ .
- Mezi řídicím obvodem a zátěží malá vazební kapacita.
- Kompaktní konstrukce bez indukčností. [6]

**Budící obvody dělíme** – budiče bez galvanického oddělení

– budiče s galvanickým oddělením

**Požadavky na výkonové budiče jsou následující:**

- Vstup tranzistoru má charakter kapacitní o velikosti 1 až 2 nF.
- Prahové napětí  $U_{GS} \sim 5V$ ,  $U_{GS} = 10$  až  $15V$  se používá pro bezpečné sepnutí.
- Spínací rychlost je cca  $t_{on} \sim 50ns$ . [6]



Obr. 3.0.1.: Pouzdra budičů [11]

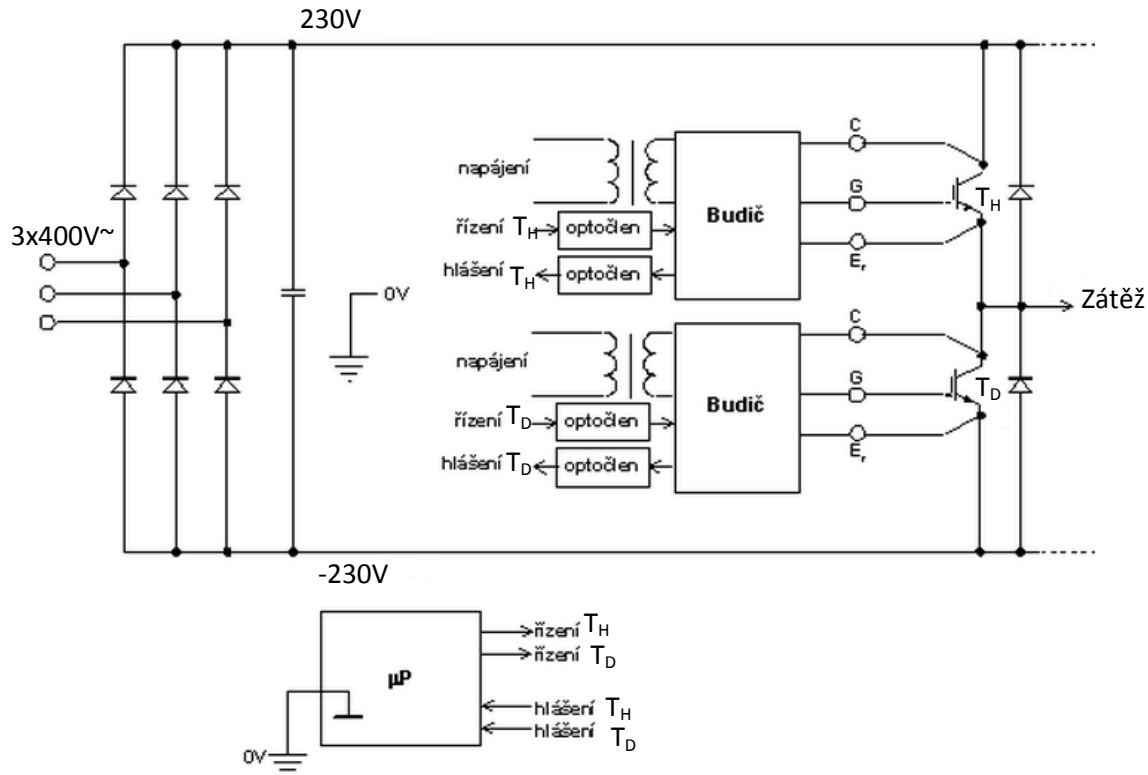


## 2.2 Budiče s galvanickým oddělením

Budící obvod tranzistoru nám generuje na svém výstupu kvalitní řídicí signál do řídicí elektrody výkonového spínacího tranzistoru. Budič nám zajišťuje galvanické oddělení řídicího signálu na rozhraní mezi výkonovými a řídicími obvody měniče. Na obr. 2.2.1.: je uvedeno galvanické oddělení budiče, kde větev měniče tvoří tranzistory  $T_H$  a  $T_D$ , a je napájena ze šesti pulzního můstkového usměrňovače, kde na výstupu je stejnosměrné jmenovité napětí 540V. [6]

Ovšem oproti zemnicímu vodiči PE se nachází kladná sběrnice s potenciálem +270V, neboli ve střední hodnotě, a sběrnice záporná je na potenciálu -270V. Emitor dolního tranzistoru, čili celý spodní budič, má oproti řídicímu obvodu trvale potenciál -270V. Proto signál nejde přivést do budiče vodičem, ale jedině galvanicky oddělenou cestou. U vrchního budiče je jeho odvodová zem pevně spojena s emitorem vrchního tranzistoru, kde potenciál oproti řídicímu obvodu se pohybuje skokem na hodnoty  $\pm 270V$ , a strmost napětí  $du/dt$  dosahuje cca od  $\pm 10$  až  $\pm 120kV/\mu s$ , záleží na typu zvolených výkonových tranzistorů. [6]

To určuje velké požadavky na kvalitu galvanického oddělení. V dnešní době nejkvalitnější optočleny se stínící mřížkou, které jsou mezi optickým vysílačem a jímáčem, mají odolnost proti rušení vlivem strmosti  $du/dt$  pouze do 5 až  $10kV/\mu s$ . Ovšem optočleny v této kvalitě jsou velmi drahé, a proto se moc nepoužívají. V dnešní době jsou vyvinuty nejrůznější systémy s přenosem informací, a to jinou cestou než optickou, především se jedná o magnetický princip. [6]



Obr. 2.2.1.: Galvanické oddělení řídicího signálu pro větev výkonového měniče [6]

Budič je aktivní obvod relativně složitý, vyžaduje vlastní aktivní obvod, dále galvanické oddělení zdroje napájení. Zdroj se nejběžněji galvanicky odděluje magnetickou cestou za použití impulsních transformátorů. [6]

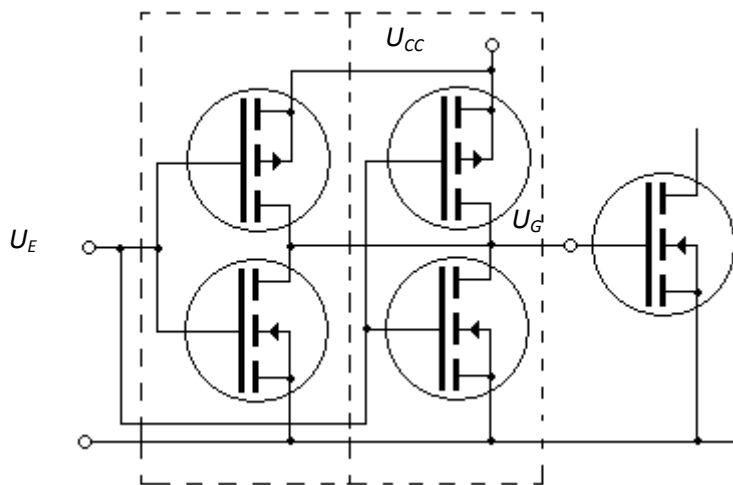
Budiče obsahují velmi rychlé elektronické ochrany, jež zajišťují takzvanou nezničitelnost řízeného tranzistoru. Informace o zvláštním stavu jakékoliv ochrany je nutno hlásit zpět do řídicího systému, který je opět galvanicky oddělen. [6]

### **Možnosti galvanického oddělení řídicího signálu:**

- Optočlen = obsahuje stínící mřížku, kde optickým jímáčem musí být fotodioda a to z požadavku na odolnost proti strmosti  $du/dt$ .
- Optické vlákno = používá se u měničů velkých výkonů okolo 1MW a u vysokonapětových aplikací. Je to jedno z nejlepších řešení, ale z hlediska ceny a objemových důvodů nepoužitelných u měničů malých výkonů.
- Přenos informací magnetickou cestou
- Kombinovaný přenos informací i napájecí energie magnetickou cestou
- Redundantním přenosem informací zvýšení odolnosti oproti strmosti  $du/dt$ [6]

## **2.3 Budicí obvody tranzistorů MOSFET**

- Budič s paralelně řazenými hradly CMOS:

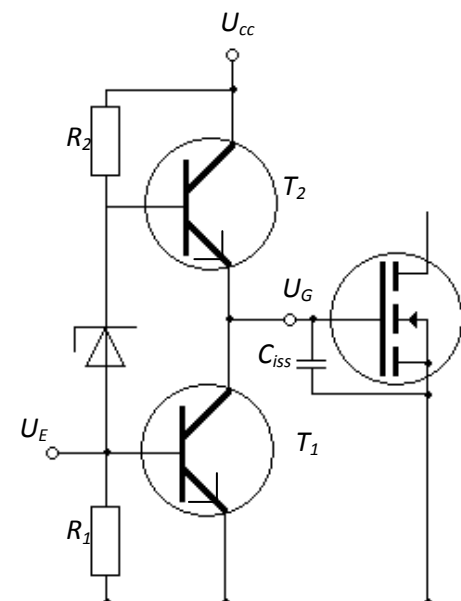


*Obr. 2.3.1.: Schéma zapojení budiče s paralelně řazenými hradly CMOS [7]*

- Tento princip je jednoduchý a ekonomický v jednom pouzdře se může vyskytovat i více hradel.
- Toto způsob zapojení obrací fázi vstupních impulsů.
- Díky paralelnímu řazení hradel lze přizpůsobit řídicí výkonový stupeň a měřit doby spínání.
- Spotřeba tohoto zapojení je velmi nízká.
- Má vysokou odolnost vůči rušení když  $U_{CC} > 8V$ .
- Výstupní stav nebude definovaný, pokud bude  $U_{CC} < 3V$ .
- Pokud vypneme napájení logické části  $U_{CC}$  budou mít velký vnitřní odpor. [7]



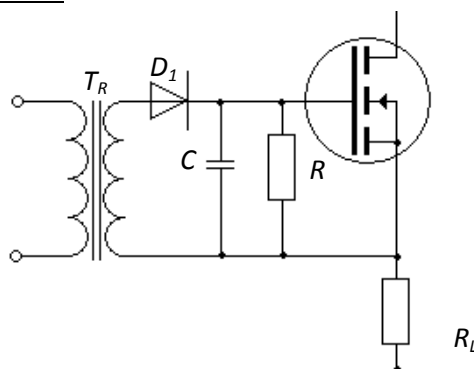
- Budič s komplementárními bipolárními tranzistory s kolektorovým výstupem:



Obr. 2.3.2.: Schéma zapojení budiče s komplementárními bipolárními tranzistory s kolektorovým výstupem [7]

- Toto způsob zapojení obrací fázi vstupních impulsů.
- Lze rychle vybíjet a nabíjet kapacitu  $C_{iss}$  výkonového tranzistoru.
- Při vypnutém napájení je velký vnitřní odpor.
- Klidový proud závisí na zapojení.
- $U_{Gmin} \geq U_{CESat}$  tranzistoru  $T_2$ .
- Při spínání  $T_1$  a  $T_2$  vzniká přesah, a může docházet k vysokým proudovým špičkám.
- Napětí  $U_E$  má nízkou překlápěcí úroveň.
- Zde se dá použít kapacitní vazba (plovoucí provoz). [7]

- Jednoduchá transformátorová vazba:



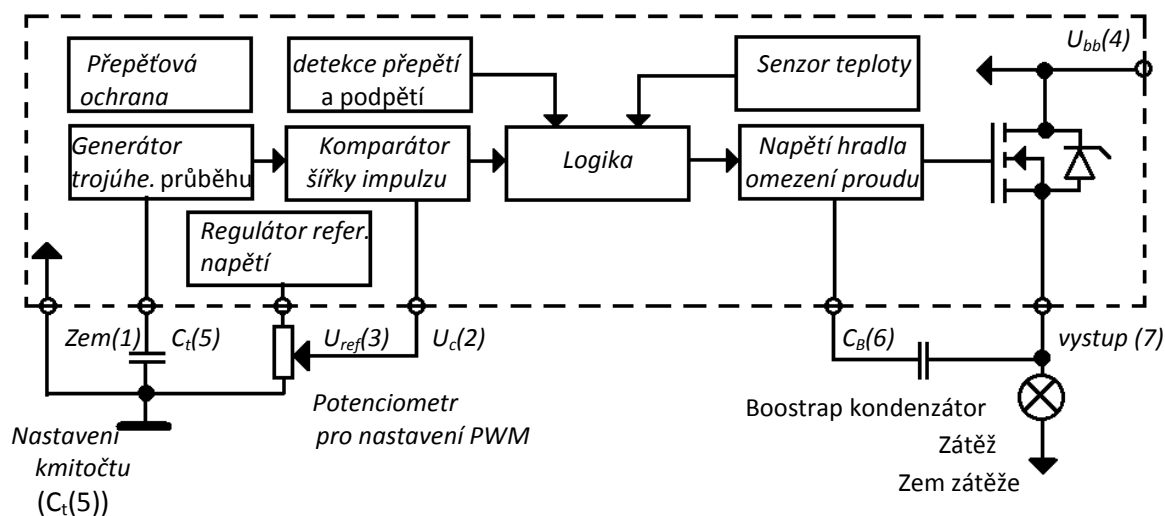
Obr. 2.3.3.: Schéma zapojení budiče s jednoduchou transformátorovou vazbou [7]

- Má pomalé vypínací a zapínací hrany
- Lze jednoduše nahradit relátkem [7]

### Dalšími budicí obvody s MOSFET tranzistory mohou být zapojení:

- Budič s bipolárními komplementárními tranzistory - emitorový sledovač
- Budič v zapojení Totem-Pole
- Rychlí budič s tranzistory v Darlingtonově zapojení
- Integrovaný budič sběrnice DS 0026 se špičkovým proudem až 2,5A použitý pro buzení MOSFETU[7]

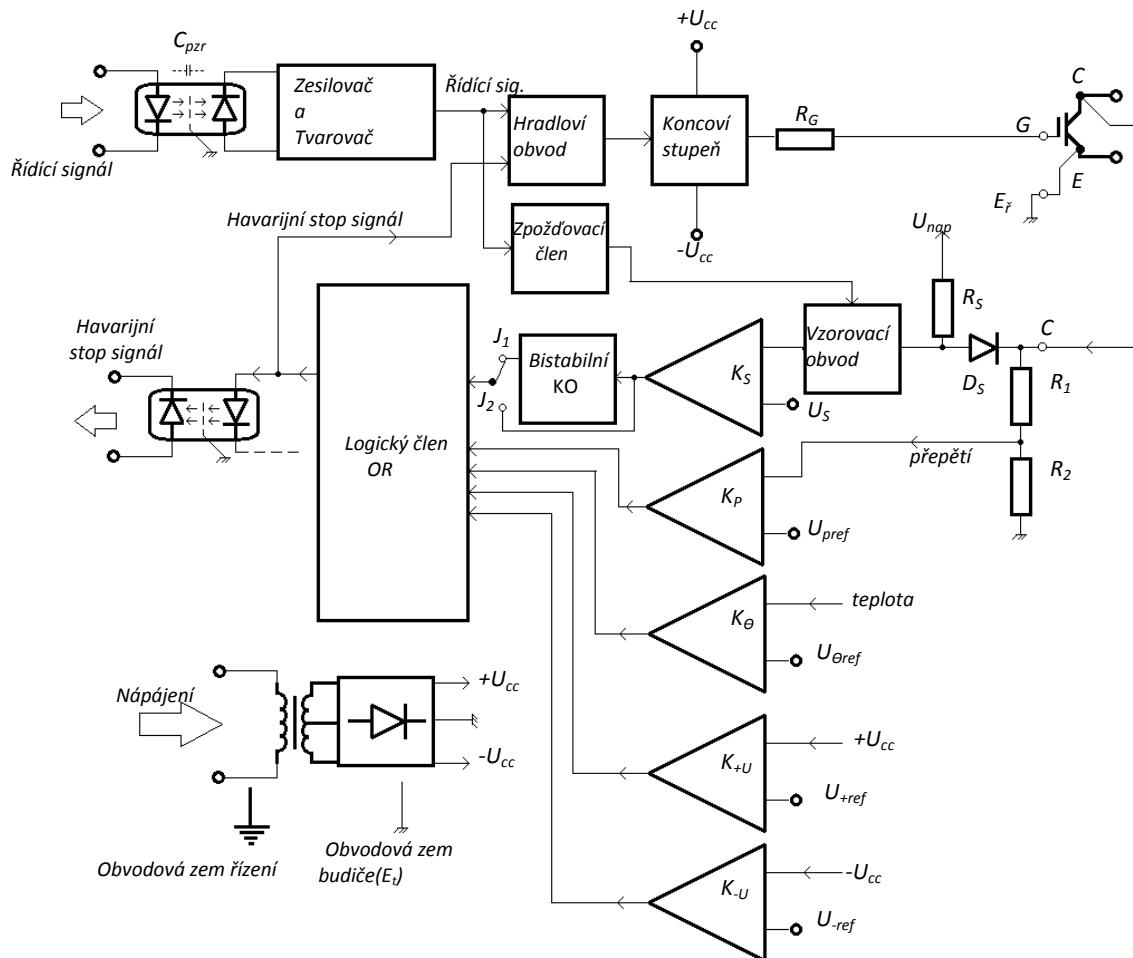
### Inteligentní MOSFET:



Obr. 2.3.4.:Blokové schéma integrovaného obvodu s výkonovým tranzistorem FET a řídicími bloky [7]

## 2.4 Budicí obvody pro IGBT tranzistory

- Inteligentní IGBT:



Obr. 2.4.1.:Blokové schéma integrovaného obvodu s výkonovým tranzistorem FET a řídicími bloky [6]

Samotný budič tvoří optočlen - zesilovač a tvarovač- hradlový obvod - koncový stupeň. Ostatní části tvoří elektrické ochrany. [6]

Z elektrických ochrany jsou svedeny všechny signály do bloku logického členu OR, kde jeho výstupní havarijní STOP signál je přiveden zpětnovazebně do hradlového obvodu. Tento signál má nejvyšší prioritu, a to nezávisle na řídicím signálu a v případě poruchy vyše signál k okamžitému, co nejrychlejšímu vypnutí výkonového tranzistoru. Ochrany jsou realizovány komparátory. [6]

**Druhy ochrany:**

- Hlídaní vlastního napájecího napětí budiče, kde komparátor  $K_{+U}$  hlídá kladné napětí a komparátor  $K_{-U}$  záporné napětí. Tato ochrana je naprosto nezbytné, bez ní by budič nebyl provozuschopný. [6]

- Komparátor  $K_\Theta$  hlídá teplotu. Nejideálnějším řešením je umístit snímač teploty co nejbližší k výkonovému čipu. Tuto ochranu nemusíme použít, je-li v měniči hlídána teplota chladiče centrálně, ale prudké přehřátí tranzistoru nezachytí a nezachrání. [6]
- Komparátor  $K_P$  slouží pro ochranu proti přepětí, protože ve vypnutém módu dochází k namáhání tranzistoru napětím  $U_d$  stejnosměrného mezi obvodem. Je-li napětí vyšší než je dovolené, tak komparátor nedovolí sepnutí. Tento komparátor musí pracovat s hysterezí. Ani tato ochrana nemusí být tvořena komparátorem, protože může být stejnosměrné napětí hlídáno centrálně. [6]
- Saturační ochranu nám tvoří komparátor  $K_S$ , je to jedna z nejdůležitějších a nejinteligentnějších ochran, která funguje tak, že nemusí snímat nadproud z odporového bočnicku, který se nachází v emitoru výkonového tranzistoru, jelikož je-li tranzistor sepnutý sám od sebe na dráze kolektor-emitor (C-E) (nelineárním) bočníkem, na kterém snímáme napěťový úbytek  $U_{CEsat}$ . Tento bočník je zcela bezindukční. [6]

Význam této výhody roste velmi rychle s rostoucí jmenovitým proudem tranzistoru. Bezindukční bočník činní tuto ochranu velmi rychlou (rychlejší princip neexistuje). Nevýhodou se ovšem stává, když se tranzistor nachází ve vypnutém stavu, protože je zde velké napětí. Proto se používají obvod  $R_S, D_S$  jako snímací. A dioda  $D_S$  se využívá k oddělení vstupu komparátoru  $K_S$  s přísunem vysokého napětí. To ovšem nestačí, protože, jakmile by došlo k vypnutí tranzistoru, tak by se na vstupu komparátoru objevilo napájecí napětí  $+U_{cc}$  (15V), které by bylo hned vyhodnoceno jako přetížení. [6]

Proto je použit vzorkovací obvod, který je řízen signálem odvozeným od řídicího signálu. Reakční doba této celé ochrany je dána úmyslným zpožděním zpožďovacího členu. Tohle zpoždění musí mít nepatrně delší čas, než je celková doba zapnutí tranzistoru. [6]

Ochranu saturační může být ještě provozována v režimu jednorázovém - propojka J1 a bistabilní klopný obvod, nebo regenerativním - propojka J2. Při tomto jednorázovém režimu zajistí při nadproudu trvalé vypnutí tranzistoru. V režimu regenerativním je vždy s novým řídicím signálem pokus o zapnutí tranzistoru, ovšem pokud neustále trvá nadproudová situace, ochrana tranzistor předčasně vypne. Jakmile dojde k zmizení nadproudu, budič se vrátí do normálního pracovního režimu. [6]

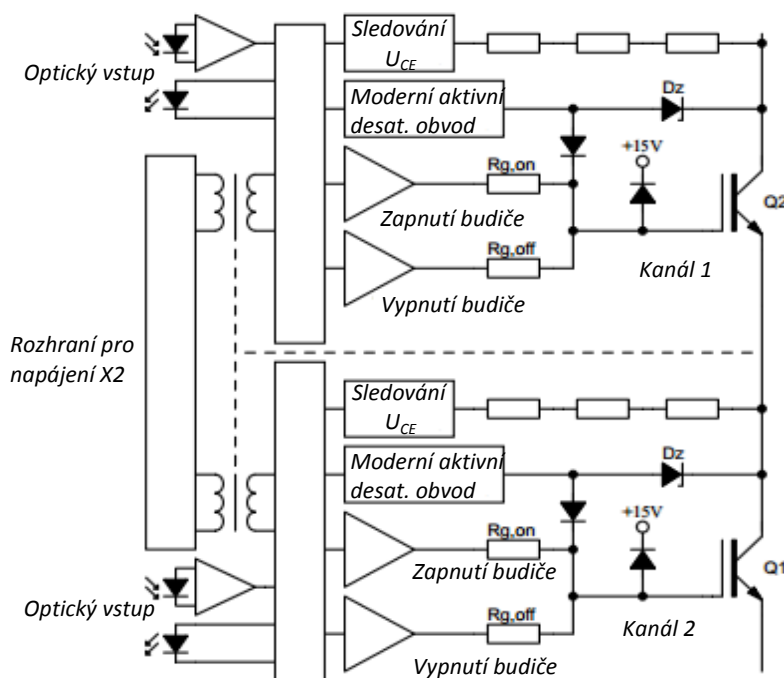
## 2.5 Budič s optickým vstupem



Obr. 2.5.1.: Budič typu 2SP0320V našroubovaný na modulu PrimePACKTM IGBT (katalog) [8]

Budič typu 2SP0320V jsou "plug and play" (budič je ihned připraven k provozu po nainstalování) budiče založeny na vysoce integrované sadě čipů velikosti-2, které byly vyvinuty společností CONCEPT. Je to soubor integrovaných obvodů zaměřených na aplikace, tyto obvody, které zahrnují řadu funkcí potřebných k návrhu inteligentních gatu budičů. Sady čipů budiče SCALE-2 jsou dalším vývojovým stupněm osvědčené technologie SCALEtechnologie. [8]

Základní struktura budiče 2SP0320V je zobrazena na obr. 2.5.2., kde hodnoty rezistorů na gatu a dalších klíčových součástek jsou ve specifikách datasheetech pro určitý typ IGBT modulu. [8]



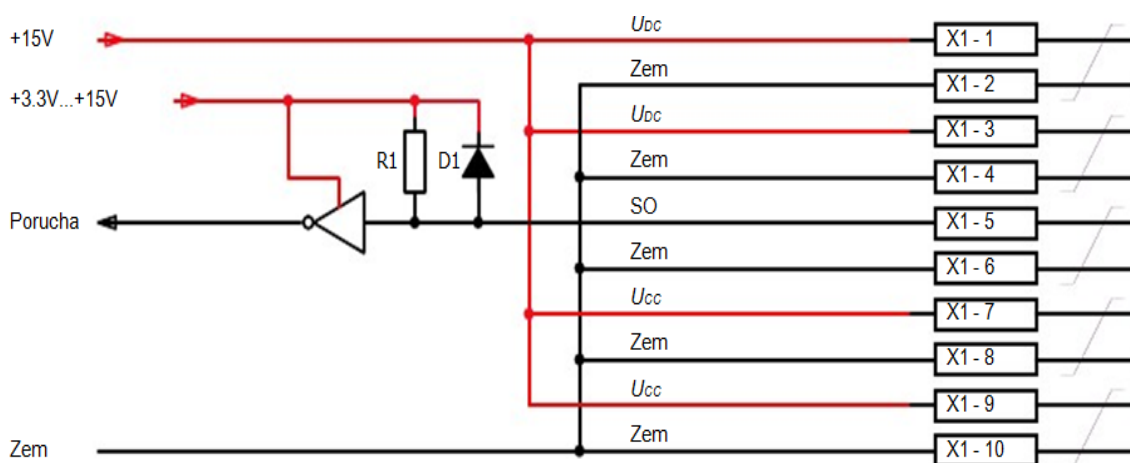
Obr. 2.5.2.: Základní schéma budiče typu 2SP0320V [8]

Tento budič obsahuje všechny nezbytné komponenty pro optimální a bezpečné řízení určitého typu IGBT modulu:

- Co nejmenší hodnoty rezistoru na gate pro minimalizování spínacích ztrát.
- Ochranu proti přepětí.
- Monitorování  $U_{ce}$  (zkratová ochrana).
- Elektrické a optické konektory.

Kromě toho budič obsahuje komponenty pro nastavení vypínací úrovně a dobu odezvy. Funkce "plug and play", která znamená, že budič je připraven k provozu ihned po nainstalování. Proto uživatel nemusí navrhovat nebo upravovat budič pro konkrétní aplikace. [8]

### Rozhraní pro konektor X2



Obr. 2.5.3.: Schéma uspořádání konektoru X2 [8]

Tento budič je vybavený 10 pinovým konektorem. Všechny sudé piny jsou použity jako zemní spojení. Liché piny 1,3,7 a 9 jsou použity jako zdroj +15V. Pin číslo 5 je použit jako stavový výstup pro monitorování zdroje napětí  $U_{CC}$ . Doporučuje se použít 10 pinový kroucený plochý kabel. Pin 5 je pak kroucený s vlastním zemním vodičem. Všechny zemní piny jsou spojeny dohromady na budiči typu 2SP0320V a měly by být spojeny na řídicí straně. Toto uspořádání má velmi nízkou indukční spojení s vysokou odolností proti rušení. [8]

Dále tento typ budiče obsahuje dva  $U_{CC}$  terminály na konektoru k napájení elektroniky primární strany. [8]

Budič také má dva  $U_{DC}$  terminály na konektoru k napájení DC-DC měničů pro sekundární strany. [8]

Všechny  $U_{CC}$  a  $U_{DC}$  terminály musí být připojeny na jediný zdroj +15V. Budič omezuje proudovou špičku při startu a není potřebné externí proudové omezení zdroje napětí  $U_{DC}$ .  $U_{DC}$  a  $U_{CC}$  terminály jsou rozděleny na rozdělené piny jen pro testování. [8]

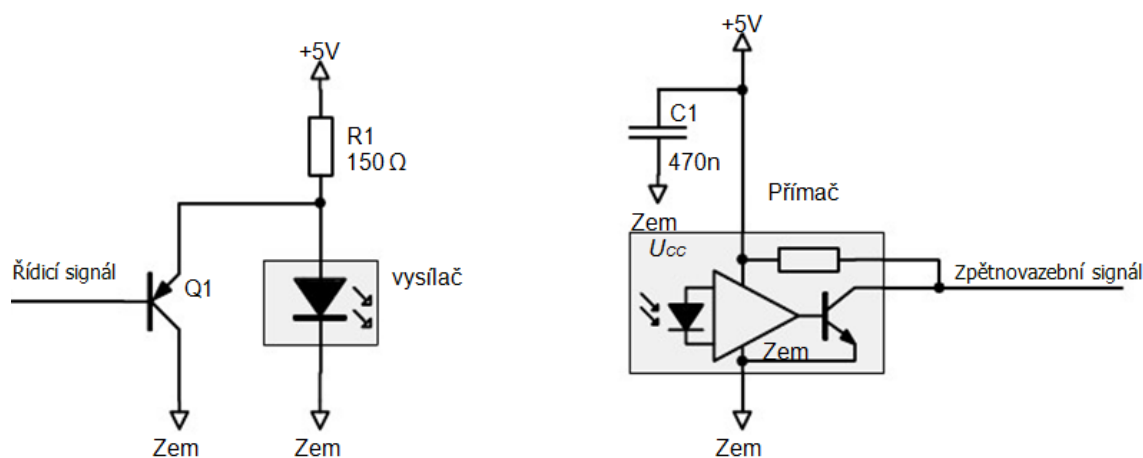
SO (stavový výstup napájení) má funkci takovou, že pokud není detekováno podpětí  $U_{CC}$  zdroje, výstupní SO má vysokou impedanci (je ve stavu vysoké impedance). Pokud je detekováno podpětí  $U_{CC}$  zdroje, stavový výstup SO se připojí k zemi. [8]

Dioda  $D_1$  musí být Schottkyho dioda a musí být použita pouze při 3,3V logiky. Pro logiku 5 až 15V může být vynechána. [8]

SO výstup je automaticky resetován asi 90ms po zmizení podpětí. Pokud není SO výstup používán, může být otevřený. [8]

### Popis optického vstupu

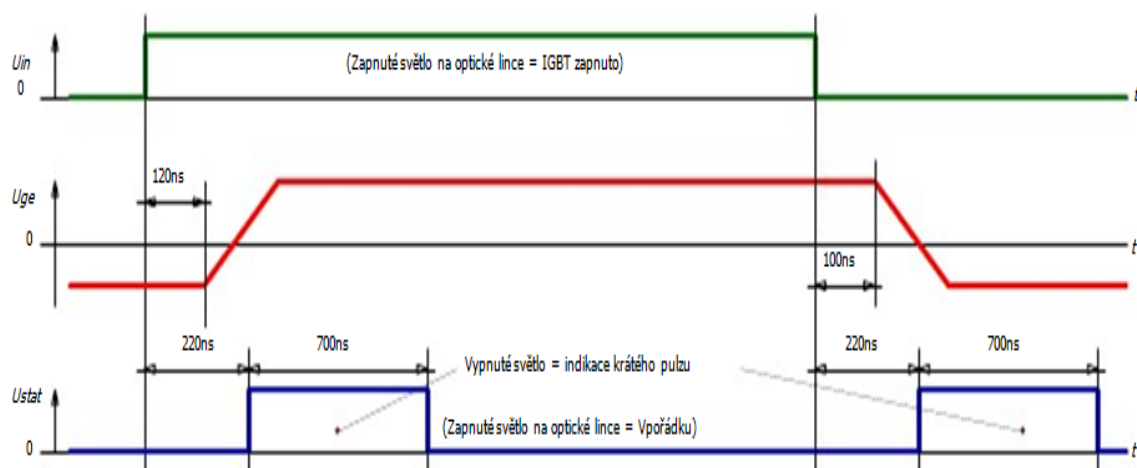
Optický vstup slouží pro přenos řídicích signálů.



Obr. 2.5.4.: Schéma zapojení optického vstupu [8]

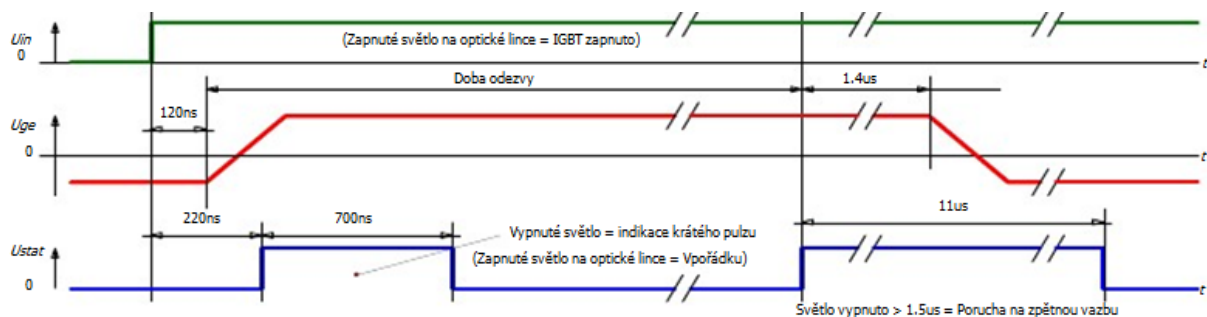
Během běžného provozu (budič je napájen zdrojem o nominálním napětí a nikde se nevyskytuje žádná chyba), stavová zpětná vazba je "zapnuté světlo" na optické lince. Selhání je signalizováno "vypnutým světlem". [8]

Každou hranu řídicího signálu indikuje budič krátkým pulzem (světlo je vypnuté po dobu asi 700ns). Protože tento jev může být sledován hostujícím kontrolérem (dohlížitelem), umožňuje tato metoda jednoduché a nepřetržité sledování všech budičů a optických linek systému na Obr. 2.5.5.: zobrazující řídicí signál a signál odezvy gate budiče při normálním provozu. [8]



Obr. 2.5.5.: Průběh budiče a zpětné vazby při normálním provozu [8]

Na Obr. 2.5.6 je zobrazena odezva budiče v případě zkratu. Chybový stav je přenesen do stavového zpětnovazebního terminálu po době odezvy. Světlo je pak vypnuto během zpoždění k pročištění chybového stavu (asi  $11\mu\text{s}$ ). Budič vypíná IGBT tranzistor asi  $1,4\mu\text{s}$  po době odezvy. IGBT tranzistor může být znovu zapnut kladnou hranou na odpovídajícím optickém vstupu po tom, co chybový stav zmizel. [8]

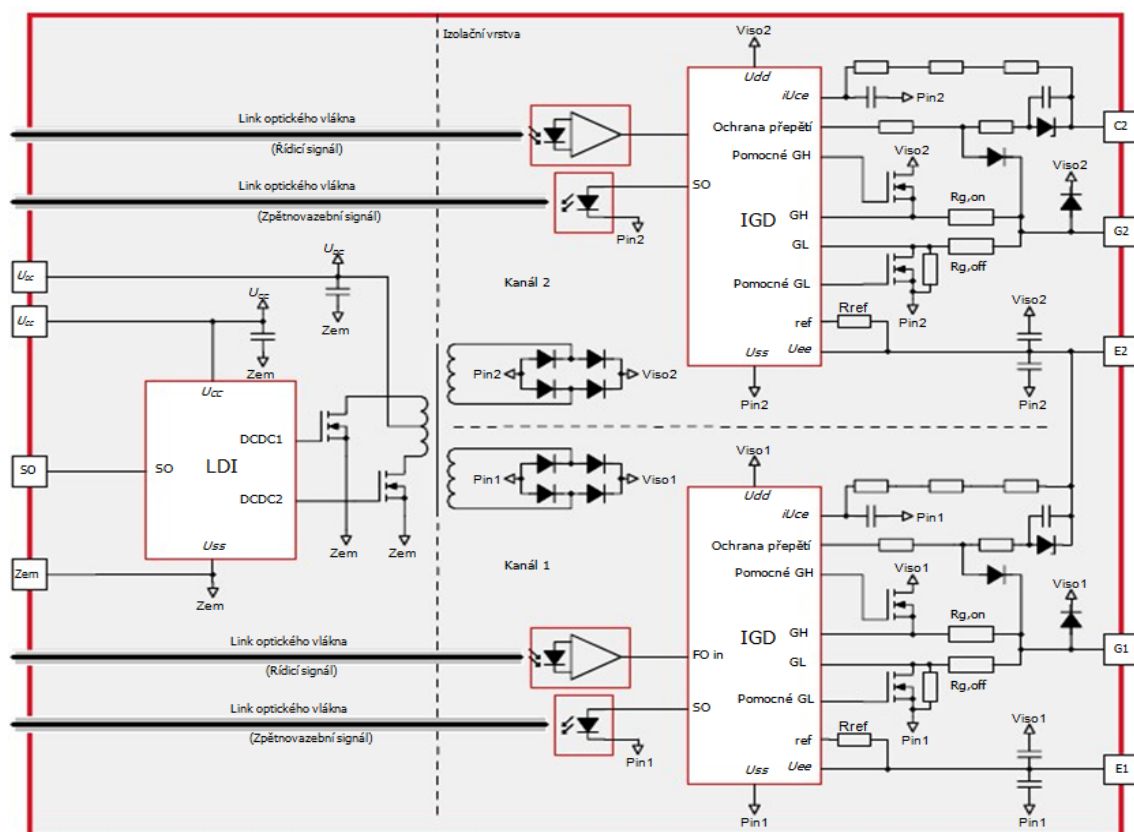


Obr. 2.5.6.: Průběh budiče a zpětné vazby při poruchovém stavu (zkrat) [8]

## Popis budiče typu 2SP0320V

Vynikající funkce 2SP0320V budičů jsou: kompaktní velikost, jednoduchá instalace - přímo na IGBT modulu, moderní desaturační obvod, čas signálu než přejde ze vstupu na výstup budiče je velmi malá, volitelná strmost napětí  $dU/dt$  zpětná vazba pro omezení vysoké strmosti napětí  $dU/dt$  při vypínání. Aktivní desaturace popisuje aktivní schéma navržené k ochraně IGBT tranzistoru proti přepětí během vypínání. Je to zvláště důležité při vypínání IGBT tranzistoru v případě vysokého DC-link(u) napětí a kolektorového proudu nebo zkratu. [8]





Obr. 2.5.7.: Blokové schéma budiče 2SP0320V [8]

## Napájení elektrická izolace

Budič je vybaven DC/DC měničem k poskytnutí elektricky izolovaného zdroje obvodům gatu budiče. Transformátory představují bezpečnou izolaci podle dané normy třídy ochrany II mezi primární a sekundární stranou.

Budič potřebuje stabilizovaný zdroj napětí. [8]

## Sledování zdroje napájení

Primární strana budiče i obě sekundární strany jsou vybaveny podpětíovou ochranou.

V případě, že na primární straně bude detekováno podpětí, je chyba přenesena na výstup SO, ale IGBT tranzistory jsou vypnuté (kanály nejsou blokovány).

V případě detekování podpětí na sekundární straně je odpovídající IGBT tranzistor řízen záporným napětím hradla, aby udržel kanál ve vypnutém stavu (kanál je blokován) a poruchový stav je přenášen pomocí optické zpětné vazby. [8]

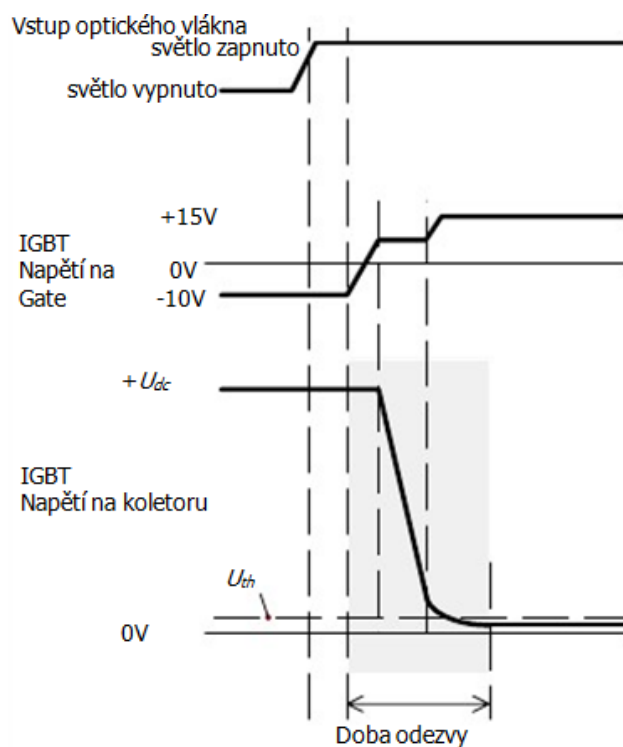
## Sledování napětí $U_{ce}$ (ochrana proti zkratu)

Sledování napětí  $U_{ce}$  je realizován přímo obvodu 2SP0320V, kde se měří napětí mezi kolektorem a emitorem IGBT tranzistoru pomocí odporové sítě. [8]

Napětí  $U_{ce}$  je kontrolováno po celou dobu odezvy viz obr. 2.5.8, kdy při zapnutí rozpozná zkrat. Pokud je napětí vyšší než naprogramované prahové napětí, tak budič zjistí zkrat na IGBT tranzistoru a signalizuje ji okamžitě zpět pomocí zpětné vazby, která je tvořená optickým vláknem. Po dalším zpoždění se odpovídající IGBT tranzistor vypne. [8]

Porucha zpětné vazby se automaticky resetuje.

IGBT tranzistor je znovu zapnut, jakmile přijde další kladná hrana signálu. [8]



Obr. 2.5.8.: Zapínací charakteristika IGBT tranzistoru [8]

### Zapnutí IGBT tranzistoru (Komutace diody proudu)

Na vstupu budiče přijde řídicí signál do gate a zapne odpovídající IGBT tranzistor.

Budič už zahrnuje odpory gate, které musí být sladěny s příslušným IGBT modulem.

Budič je optimalizován pro dosažení minimálních spínacích ztrát u relativně nízkých indukčností v rámci výkonu zásobníku. [8]

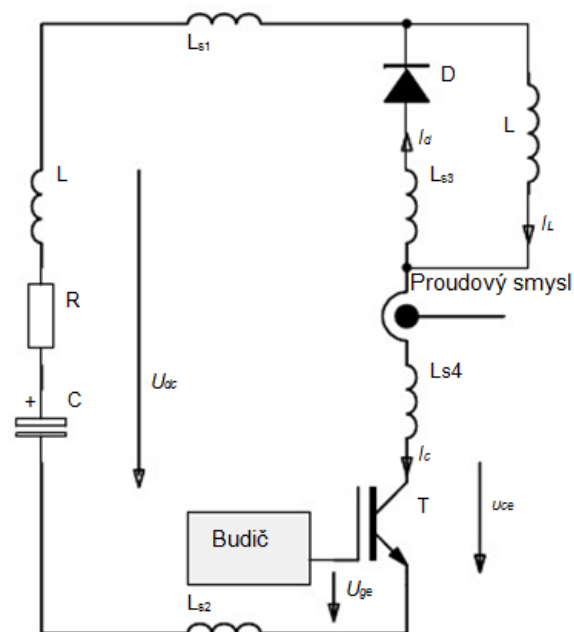
### Vypnutí IGBT tranzistoru

IGBT tranzistor je vypnutý, pokud na vstupu je nízké napětí. Rychlé vypnutí IGBT tranzistoru může způsobit přepětí, které zvyšuje stejnosměrné napětí mezi obvodem nebo zatěžující proud.

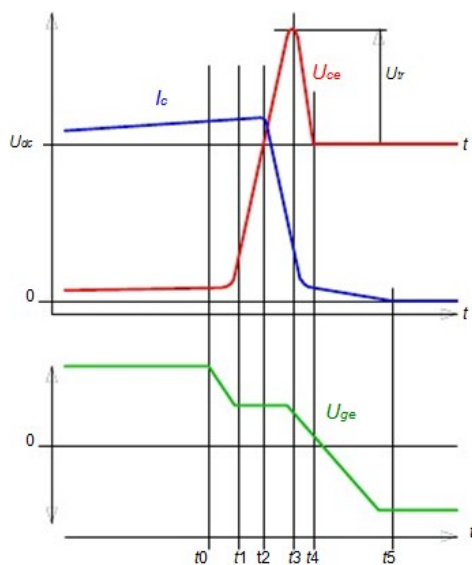
Vypnutí lze aproximovat. [8]

$$U_{TR} = -L_S \cdot \frac{di}{dt} [U, H, A, s] \quad (2.1)$$

Kde  $U_{TR}$  je vypínací přepětí a  $L_S$  indukčnost



Obr. 2.5.9.: Testovací obvod budiče 2SP0320V pro IGBT tranzistor [8]



Obr. 2. 5. 10.: Průběh vypínání [8]

$t_0$ =Zahájení vypínacího procesu

$t_1$ =Zahájení vypínacího času

$t_2$ =Pokles kolektorového proudu

$t_3$ =Maximální kolektorové napětí

$t_4$ =IGBT modul blokuje, zbytkový kolektorový proud

$t_5$ =Zánik kolektorového proudu [8]

## 2.6 Optické vlákno

Optická vlákna bývají nejčastěji vyrobena ze skleněného nebo plastového materiálu. Vláknem pomocí světla přenáší signály ve směru podélné své osy. Optická vlákna se využívají především v komunikacích, kde se používají pro přenos na větší vzdálenosti při vyšších přenosových rychlostech. Výhodou optických vláken oproti kovovým vodičům je především v tom, že mají menší ztráty, a také že na vlákna nepůsobí elektromagnetická indukce. Optická vlákna mohou být využita i v řadě dalších aplikací jako jsou snímače a vláknové lasery. [9]

### Využití v komunikaci

Optická vlákna se používají v komunikaci i díky tomu, že jsou pružná a mohou být svázána do svazků. Velká výhoda je pro delší vzdálenosti, protože světlo prochází přes vlákno s malým útlumem oproti elektrickému kabelu s kovovými vodiči. Každé vlákno může přenášet několik nezávislých signálů, ale každý musí mít použito jinou vlnovou délku světla. [9]

### Princip funkce

Optické vlákno má tvar válečkového dielektrického vlnovodu, kde se šíří elektromagnetické vlny nejčastěji světlo případně infračervené záření ve směru osy vlákna, u kterého využívá principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným lomem indexu. Plášť nazýváme obal, který je okolo jádra a slouží jako primární ochrana. Vnitřní částí vlákna je jádro. K vazbě optického signálu na obal musí mít index lomu menší než je u jádra. [9]

### Typy vláken:

#### Mnohovidové optické vlákno

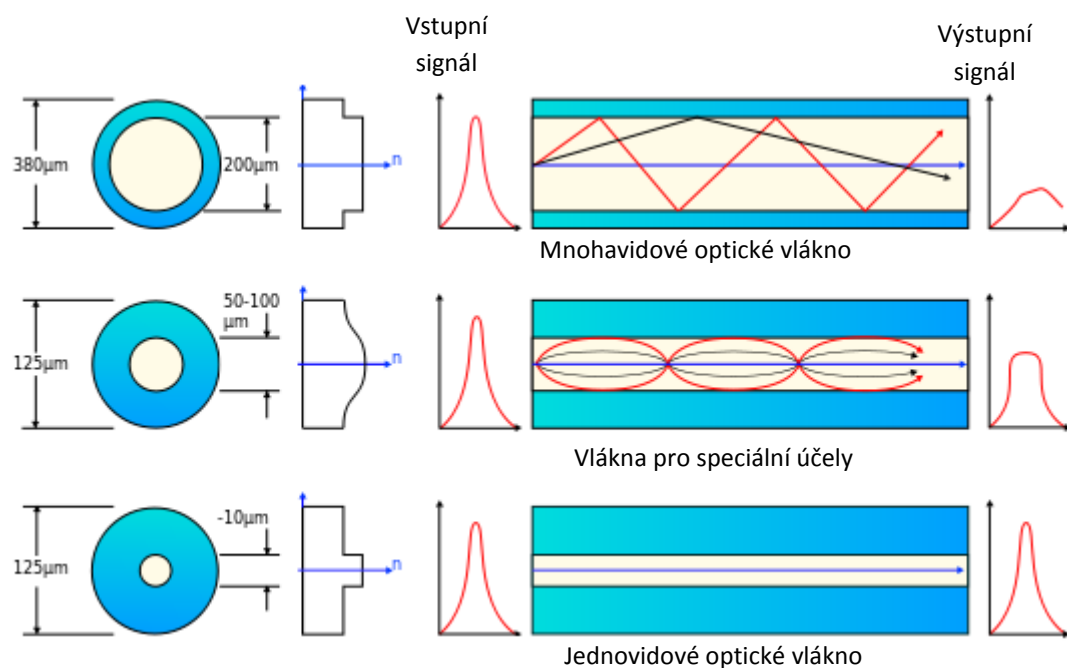
Tento druh optického vlákna se nejhojněji využívá pro komunikaci na kratší vzdálenosti, jako je komunikace uvnitř budovy či areálu. Rychlost přenosu se pohybuje od 10Mbit/s až 10Gbit/s do vzdálenosti 600 metrů. [9]

#### Jednovidové optické vlákno

Tento druh optického vlákna se používá pro přenos dat na větší vzdálenosti, jako například mezi městy, státy, popřípadě kontinenty. Tato vlákna se uplatňují především v telekomunikacích a pro vysokorychlostní přenos internetu. [9]

#### Vlákna pro speciální účely

Tento typ vlákna se liší konstrukcí. Buď je jádro konstruováno s neválečkovým jádrem, anebo obkládací vrstvou, často mívají příčný řez tvaru elipsy nebo obdélníku. [9]



Obr. 2.6.1.: Typy optických vláken [9]

## Výhody a nevýhody optického vlákna

Výhody:

- Velká přenosová kapacita
- Nízká energetická náročnost přenosu
- Odolnost proti rušení a odposlechu
- Malé rozměry a nízká hmotnost kabelů
- Úspora barevných kovů
- Vhodná do náročných provozních podmínek

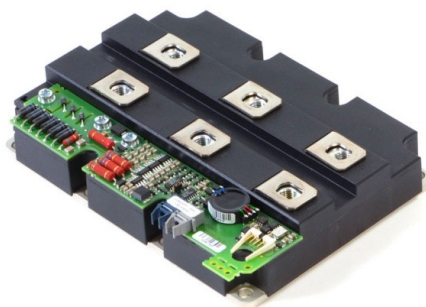
Nevýhody:

- Vysoké nároky na výrobní proces [10]

### 3. Průzkum trhu

Budiče jsou rozděleny podle výrobce IGBT tranzistoru. Protože výkonové budiče s optickým vstupem pro MOSFET a IGBT tranzistory vyrábí pouze firma CT Concept, která patří mezi největší společnost, co se pohybuje na trhu v této oblasti. Ostatní firmy vyrábí budiče pouze bez optického vstupu, případně že nabízí s optickým vstupem je to budič od firmy CT Concept.

#### 3.1 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy ABB



Obr. 3.1.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy ABB [11]

Tab. 3.1.1.: Parametry budiče pro napětí 1200V pro IGBT tranzistor od firmy ABB [11]

##### Pro napětí 1200V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	2	Vlákno
1200A	2	Vlákno
2400A	1	Vlákno
3600A	1	Vlákno

Tab. 3.1.2.: Parametry budiče pro napětí 1700V pro IGBT tranzistor od firmy ABB [11]

##### Pro napětí 1700V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	2	Vlákno
1200A	2	Vlákno
1600A	1	Vlákno
1800A	1	Vlákno
2400A	1	Vlákno
3600A	1	Vlákno

Tab. 3.1.3.: Parametry budiče pro napětí 2500V pro IGBT tranzistor od firmy ABB [11]

**Pro napětí 2500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1200A	1	Vlákno

Tab. 3.1.4.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy ABB [11]

**Pro napětí 3300V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1500A	1	Vlákno

Tab. 3.1.5.: Parametry budiče pro napětí 4500V pro IGBT tranzistor od firmy ABB [11]

**Pro napětí 4500V**

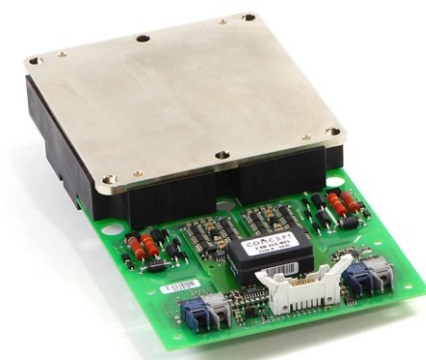
IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
650A	1	Vlákno
900A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno

Tab. 3.1.6.: Parametry budiče pro napětí 6500V pro IGBT tranzistor od firmy ABB [11]

**Pro napětí 6500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
400A	1	Vlákno
600A	1	Vlákno
750A	1	Vlákno

### 3.2 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Dynex



Obr. 3.2.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Dynex [11]

Tab. 3.2.1.: Parametry budiče pro napětí 1200V pro IGBT tranzistor od firmy Dynex [11]

#### Pro napětí 1200V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
2400A	1	Vlákno

Tab. 3.2.2.: Parametry budiče pro napětí 1700V pro IGBT tranzistor od firmy Dynex [11]

#### Pro napětí 1700V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
2400A	1	Vlákno

Tab. 3.2.3.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Dynex [11]

#### Pro napětí 3300V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
400A	1	Vlákno
800A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno

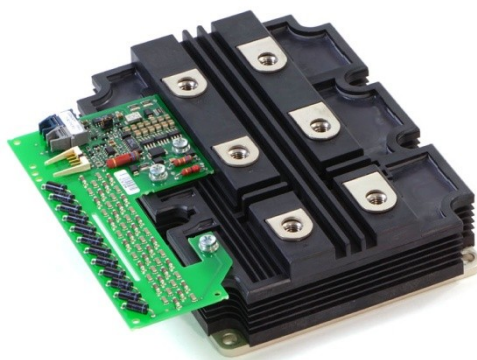
Tab. 3.2.4.: Parametry budiče pro napětí 4500V pro IGBT tranzistor od firmy Dynex [11]

#### Pro napětí 4500V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
600A	1	Vlákno
900A	1	Vlákno



### 3.3 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Fuji



Obr. 3.3.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Fuji [11]

Tab. 3.3.1.: Parametry budiče pro napětí 1200V pro IGBT tranzistor od firmy Fuji [11]

#### Pro napětí 1200V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	2	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1600A	1	Vlákno
3600A	1	Vlákno

Tab. 3.3.2.: Parametry budiče pro napětí 1700V pro IGBT tranzistor od firmy Fuji [11]

#### Pro napětí 1700V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	2	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1600A	1	Vlákno
3600A	1	Vlákno

Tab. 3.3.3.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Fuji [11]

#### Pro napětí 3300V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno

Tab. 3.3.4.: Parametry budiče pro napětí 4500V pro IGBT tranzistor od firmy Fuji [11]

**Pro napětí 4500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
600A	1	Vlákno
900A	1	Vlákno

### 3.4 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Hitachi



Obr. 3.4.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Hitachi [11]

Tab. 3.4.1.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Hitachi [11]

**Pro napětí 3300V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1500A	1	Vlákno

Tab. 3.4.2.: Parametry budiče pro napětí 4500V pro IGBT tranzistor od firmy Hitachi [11]

**Pro napětí 4500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
900A	1	Vlákno

Tab. 3.4.3.: Parametry budiče pro napětí 6500V pro IGBT tranzistor od firmy Hitachi [11]

**Pro napětí 6500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
750A	1	Vlákno

### 3.5 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Infineon (eupec)



Obr. 3.5.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Infineon (eupec) [11]

Tab. 3.5.1.: Parametry budiče pro napětí 1200V pro IGBT tranzistor od firmy Infineon (eupec) [11]

**Pro napětí 1200V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
450A	2	Vlákno
600A	2	Vlákno
800A	2	Vlákno
900A	2	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1400A	2	Vlákno
2400A	1	Vlákno
3600A	1	Vlákno

Tab. 3.5.2.: Parametry budiče pro napětí 1700V pro IGBT tranzistor od firmy Infineon (eupec) [11]

**Pro napětí 1700V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
450A	2	Vlákno
650A	2	Vlákno
800A	2	Vlákno
1000A	2	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1200A	2	Vlákno
1400A	2	Vlákno
1600A	1	Vlákno
1800A	1	Vlákno
2400A	1	Vlákno
3600A	1	Vlákno

Tab. 3.5.3.: Parametry budiče pro napětí 2500V pro IGBT tranzistor od firmy Infineon (eupec) [11]

**Pro napětí 2500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1500A	1	Vlákno

Tab. 3.5.4.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Infineon (eupec) [11]

**Pro napětí 3300V**

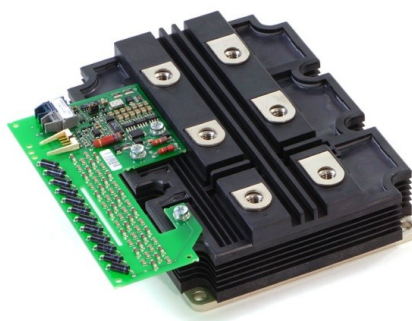
IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
400A	1	Vlákno
800A	1	Vlákno
1000A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1500A	1	Vlákno

Tab. 3.5.5.: Parametry budiče pro napětí 6500V pro IGBT tranzistor od firmy Infineon (eupec) [11]

**Pro napětí 6500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
200A	1	Vlákno
400A	1	Vlákno
600A	1	Vlákno
750A	1	Vlákno

### 3.6 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Ixys



Obr. 3.6.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Ixys[11]

Tab. 3.6.1.: Parametry budiče pro napětí 1700V pro IGBT tranzistor od firmy Ixys [11]

**Pro napětí 1700V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1800A	1	Vlákno
2400A	1	Vlákno

Tab. 3.6.2.: Parametry budiče pro napětí 2500V pro IGBT tranzistor od firmy Ixys [11]

**Pro napětí 2500V**

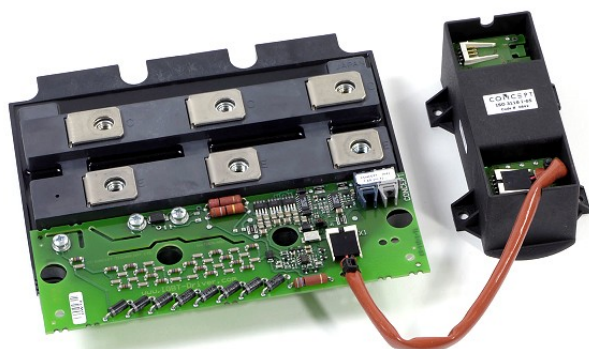
IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1200A	1	Vlákno

Tab. 3.6.3.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Ixys [11]

**Pro napětí 3300V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1200A	1	Vlákno

### 3.7 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Mitsubishi/Powerex



Obr. 3.7.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Mitsubishi/Powerex [11]

Tab. 3.7.1.: Parametry budiče pro napětí 1700V pro IGBT tranzistor od firmy Mitsubishi/Powerex [11]

#### Pro napětí 1700V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	2	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1800A	1	Vlákno
2400A	1	Vlákno

Tab. 3.7.2.: Parametry budiče pro napětí 2500V pro IGBT tranzistor od firmy Mitsubishi/Powerex [11]

#### Pro napětí 2500V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
400A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno

Tab. 3.7.3.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Mitsubishi/Powerex [11]

#### Pro napětí 3300V

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
800A	1	Vlákno
1200A	1	Vlákno
1500A	1	Vlákno

Tab. 3.7.4.: Parametry budiče pro napětí 4500V pro IGBT tranzistor od firmy Mitsubishi/Powerex [11]

**Pro napětí 4500V**

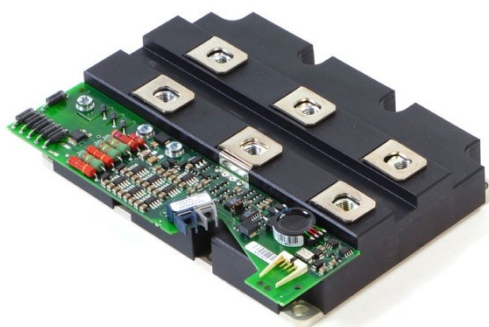
IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
400A	1	Vlákno
600A	1	Vlákno
900A	1	Vlákno

Tab. 3.7.5.: Parametry budiče pro napětí 6500V pro IGBT tranzistor od firmy Mitsubishi/Powerex [11]

**Pro napětí 6500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
200A	1	Vlákno
600A	1	Vlákno

### 3.8 Budiče pro IGBT tranzistory od firmy Toshiba



Obr. 3.8.1.: Budič od firmy CT Concept pro IGBT tranzistory od firmy Toshiba [11]

Tab. 3.8.1.: Parametry budiče pro napětí 3300V pro IGBT tranzistor od firmy Toshiba [11]

**Pro napětí 3300V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
1200A	1	Vlákno

Tab. 3.8.2.: Parametry budiče pro napětí 4500V pro IGBT tranzistor od firmy Toshiba [11]

**Pro napětí 4500V**

IGBT $I_C$	Počet kanálů	Rozhraní
900A	1	Vlákno

### 3.9 Důležité parametry budiče pro výběr

Pro výběr vhodného budiče pro daný tranzistor, kde tranzistor je vybrán dle zvolené aplikace, je nejdůležitější zdali budič zvládne daný tranzistor uřídit. Pro výběr budiče použijeme IGBT tranzistor od firmy Infineon (eupec) typ FF450R12IE4.

#### Maximální hodnoty tranzistoru

Tab. 3.9.1.: Maximální hodnoty IGBT tranzistoru typu FF450R12IE4 od firmy Infineon (Eupec) [12]

<b>Napětí kolektor emitor</b>	1200V
<b>Proud kolektoru</b>	450A
<b>Opakující špičkový kolektorový proud</b>	900A
<b>Celkový ztrátový výkon</b>	2,55kW
<b>Saturační napětí</b>	$\pm 20V$

#### Charakteristické hodnoty

Tab. 3.9.2.: Charakteristické hodnoty IGBT tranzistoru typu FF450R12IE4 od firmy Infineon (Eupec) [12]

<b>Saturační napětí</b>	2,05V
<b>Vnitřní odpor gatu</b>	2,4 $\Omega$
<b>Doba zpoždění</b>	0,25 $\mu s$
<b>Soba nárůstu</b>	0,1 $\mu s$
<b>Doba přesahu</b>	0,7 $\mu s$
<b>Doba poklesu</b>	0,14 $\mu s$

Na základě těch to hodnot IGBT tranzistoru typu FF450R12IE4 od firmy Infineon (Eupec), jsem vybral budič od firmy CT Concept typ 2SP0320V.



### Důležité parametry budiče

Tab. 3.9.3.: Charakteristické hodnoty budiče typu 2SP0320V od firmy CT Concept [8]

<b>Výstupní výkon</b>	3W
<b>Maximální výstupní proud</b>	$\pm 20\text{A}$
<b>Spínací frekvence</b>	0 až 30kHz
<b>Napájecí proud</b>	175mA
<b>Napájecí proud při plném zatížení</b>	580mA
<b>Zpoždění při zapnutí</b>	120ns
<b>Zpoždění při vypnutí</b>	100ns
<b>Napět'ová úroveň pro zapnutí</b>	+15V
<b>Napět'ová úroveň pro vypnutí</b>	-10V

## 5. Závěr

V práci je popsán budič s optickým vstupem, který se používá pro řízení polovodičových spínacích součástek. Samotné budiče se používají v automobilovém průmyslu (hybridní automobily a elektromobily) nebo pro ovládání motorů větrných a solárních elektráren.

Budiče s optickým vstupem mají oproti klasickým budičům s kabelovým vstupem řadu výhod. Největší výhodou budiče s optickým vstupem je elektromagnetická imunita, která zabraňuje rušení a nedochází k znehodnocování řídicího signálu. Což vede i k samotné kvalitě signálu, protože signál se nám jeví ve formě logické 1 nebo 0 (světlo svítí nebo nesvítí), kde je na konci D/A a A/D převodník, který převádí signál na patřičnou hodnotu. Druhou velkou výhodou spatřujeme v galvanickém oddělení řídicího signálu. Nemusí být zde použit další obvod pro oddělování řídicího signálu například transformátorovou vazbou. Výbornou vlastností oproti klasickému budiči je také, že má až pěti násobně kratší čas o zpracování poruchového stavu.

Mezi nevýhody budičů s optickým vstupem můžeme považovat cenu. Rozdíl ceny budiče s optickým vstupem od budiče klasického dělá 133,8 eur (3433,464Kč budeme-li uvažovat kurz eura 25,8Kč), čili víc jak dvojnásobek od klasického budiče stejného typu, kde jeho cena je 130,22 eur (3371,94Kč), proto si koncový uživatel musí rozmyslet, pro jaké aplikace daný budič chce použít. Cenový rozdíl tohoto budiče ovlivňuje především optické příslušenství, protože budič principiálně zůstává pořád stejný. Další jeho nevýhodou vidíme, že doba přesahu při zapínání  $t_{d(on)}$  bývá až o jednu třetinu větší, a doba zpoždění při vypínání  $t_{d(off)}$  je taktéž nepatrně větší. Z průzkumu trhu se jeví jako hlavní nevýhoda, že budiče s optickým vstupem jsou produktem pouze jedné firmy a to firmy CT Concept. Není žádná podobná firma, se kterou by si mohla konkurovat, s tímto konkrétním produktem a svádět tak marketingový boj na trhu. Cíl bakalářské práce byl splněn.

Řídicí obvody s optickým vstupem se vyrábějí nejenom kvůli svým výhodám a ceně produktu, ale také kvůli tomu, že průmysl jako celek se snaží pomalu přejít k využívání optických přenosů. Sice tato technologie má z počátku vyšší náklady na investici, ale s ohledem na budoucnost, ve které bude mít tato technologie ještě větší progres a uplatnění, se to jeví jako výhodná investice.

## Bibliografie

1. **Martin, Černík.** *Výkonové spínané prvky a výkonová elektronika*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2008.
2. **Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava.** *Výkonové spínací prvky*. Ostrava : Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava, 2003.
3. **František, Vondrášek.** *Výkonová elektronika. Svazek 1*. Plzeň : ZČU, 2003.
4. **A., Wintrich.** *Application Manual Power Semiconductors*. Nuremberg : SEMIKRON International GmbH, 2011.
5. **Petr ,Chebiš.** *Výkonová elektronika I*. Ostrava : Vysoká škola báňská technická univerzita ostrava, 2007.
6. **Ing. Pavel Vorel, Ph.D. a Patočka, Doc. Dr. Ing. Miroslav.**  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html>. [Online] 21. 5 2004. [Citace: 21. 2 2013.]  
<http://www.elektrorevue.cz>.
7. <http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1M14SP2/P6-SP2-FETY-IGBT.pdf>. [Online] [Citace: 5. 3 2013.] <http://motor.feld.cvut.cz>.
8. <http://www.igbt-driver.com>. [http://www.igbt-driver.com/fileadmin/Public/PDF/Products/ENG/SCALE-2/PnP/2SP0320/Manuals/2SP0320V\\_and\\_2SP0320S\\_Manual.pdf](http://www.igbt-driver.com/fileadmin/Public/PDF/Products/ENG/SCALE-2/PnP/2SP0320/Manuals/2SP0320V_and_2SP0320S_Manual.pdf). [Online] [Citace: 25. 3 2013.]
9. [http://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9\\_vl%C3%A9kno](http://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9_vl%C3%A9kno). [Online] [Citace: 22. 3 2013.]  
<http://cs.wikipedia.org>.
10. [www.comtel.cz/files/download.php?id=5112](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=5112). [Online] [Citace: 22. 3 2013.] [www.comtel.cz](http://www.comtel.cz).
11. <http://www.igbt-driver.com/en/support/igbt-manufacturers.html>. <http://www.igbt-driver.com>. [Online] [Citace: 1. 4 2013.]
12. [achttp://www.infineon.com/dgdl?folderId=db3a304412b407950112b4095b0601e3&fileId=db3a30431f848401011feb871c423ea4](http://www.infineon.com/dgdl?folderId=db3a304412b407950112b4095b0601e3&fileId=db3a30431f848401011feb871c423ea4). [Online] [Citace: 12. 5 2013.] <http://www.infineon.com>.